

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program N2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Degradace PE u technologie vyfukování

Degradation of PE in the Blow Molding Process

Bc. Václav Bišický

KSP – TP –

Vedoucí diplomové práce: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld - *TU v Liberci*

Konzultant diplomové práce: Ing. Petr Karásek – *Kautex Textron Bohemia, spol. s r.o.*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	60
Počet tabulek	6
Počet příloh	6
Počet obrázků	15

Datum: 3. 1. 2014

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Školní rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro

Bc. Václav BIŠICKÝ

obor

strojírenská technologie

forma studia

magisterské navazující studium

Název diplomové práce:

Degradace PE u technologie vyfukování

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše současného stavu použití regranulátu ve firmě Kautex Textron Bohemia.
2. Popis a výběr procesních vlivů na degradaci regranulátu PE.
3. Experimentální měření vlivu vybraných parametrů na degradaci PE.
4. Vyhodnocení vlivu degradace na rozměrovou stabilitu u vybraného dílu.
5. Vyhodnocení a diskuze výsledků, doporučení pro výrobu, ekonomické zhodnocení.

Vedoucí DP: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld, TU v Liberci

Konzultant : Ing. Petr Karásek, Kautex Textron Bohemia Kněžmost, spol. s r.o.

Literatura:

- [1] Brydson, J. A.. Plastics Materials, Butterworth Scientific, London, 1989
- [2] Domininghaus, H. Plastics for Engineers (Materials, Properties, Applications, Hanser Publisher, Munich, 1993
- [3] Lee, N. C. Blow Molding Design Guide, Hanser, 1998.
- [4] Příslušné normy ČSN EN ISO
- [5] Firemní materiály

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra oddělení strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: N2301 – Strojírenství

Student: Bc. Václav Bišický

Téma práce: Degradace PE u technologie vyfukování
Degradation of PE at blow molding technology

Číslo DP: KSP – TP –

Vedoucí DP: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld - *TU v Liberci*

Konzultant: Ing. Petr Karásek – *Kautex Textron Bohemia, spol. s r.o.*

Abstrakt: V teoretické části diplomové práce je charakterizována technologie vytlačovacího vyfukování a jsou zde popsány mechanismy způsobující degradaci polymerů. Praktická část se zabývá experimentálním měřením vlivu procesních parametrů vytlačovacího vyfukování (otáčky šneku a teplota taveniny) na degradaci polyethylenu. Míra degradace polyethylenu byla určována zkouškou indexu toku taveniny z recyklátu nádrží. Dále byl posuzován vliv degradace recyklátu na rozměrovou stabilitu nádrže pomocí skenování nádrže na 3D skeneru.

Klíčová slova: vytlačovací vyfukování, degradace, polyethylen, polymery, měření

Abstract: Theoretical part of the thesis describes technology of extrusion blow molding and explains the mechanisms of causing a degradation of polymers. The practical part deals with the experimental measurement of the effect of extrusion blow molding process parameters (screw speed and melt temperature) on the degradation of polyethylene. The rate of degradation polyethylene was determined by examination of melt flow index from tanks regrind. It was also evaluated the effect of degradation of recycled material on the dimensional stability of the tank using 3D scanning the surface of the tank.

Key words: extrusion blow molding, degradation, polyethylene, polymers, measuring

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 3. ledna 2014

.....
Bc. Václav Bišický
Sukorady 105
294 06 Březno

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi za poskytnuté rady a připomínky při vedení mé diplomové práce. Dále děkuji společnosti Kautex Textron Bohemia, spol. s r.o. za možnost zpracování diplomové práce. Také děkuji všem kolegům a přátelům, kteří mi svou podporou a svými názory přispěli k vytvoření této práce.

V neposlední řadě patří mé poděkování rodině za podporu a péči, kterou mi poskytovala po celou dobu studia.



OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	8
1. ÚVOD	10
2. TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1 Technologie zpracování plastů/polymerů	11
2.2 Technologie vyfukování polymerů	11
2.2.1 Vstřikovací vyfukování	11
2.2.2 Vytlačovací vyfukování	12
2.2.2.1 Koextruze	14
2.2.3 Vyfukování s dloužením	16
2.3 Stroje pro vytlačovací vyfukování	17
2.3.1 Vytlačovací stroj	17
2.3.2 Vytlačovací hlava	18
2.4 Formy pro vyfukování	20
2.5 Polymery	22
2.5.1 Rozdělení polymerů	22
2.6 Degradace polymerů	26
2.6.1 Depolymerizace a štěpení	26
2.6.2 Mechanizmy koroze polymerů	27
2.6.3 Faktory způsobující degradaci	30
2.7 Procesní vlivy působící na degradaci PE	33
2.8 Současný stav použití regranulátu	34
2.9 Hodnocení tokových vlastností plastů	35
2.9.1 Index toku taveniny	35
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	36
3.1 Cíl práce	36
3.2 Použitý materiál PE	36
3.3 Využitý vyfukovací stroj	37
3.4 Příprava vzorků pro zkoušku ITT	38
3.5 Příprava vzorků nádrží pro zkoušku měření rozměrové stability	40
3.6 Zkouška ITT	41



3.6.1 Provedení zkoušky ITT podle ČSN EN ISO 1133	43
3.7 Měření rozměrové stability vybraného dílu	44
3.7.1 Provedení zkoušky rozměrové stability	46
4. VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	47
4.1 Výsledky zkoušky ITT	47
4.1.1 Vyhodnocení výsledků zkoušky ITT dle ČSN EN ISO 1133	47
4.2 Výsledky zkoušky rozměrové stability	50
4.2.1 Vyhodnocení výsledků rozměrové stability	50
5. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	52
6. ZÁVĚR.....	53
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	55
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	58
SEZNAM TABULEK	59
SEZNAM PŘÍLOH.....	60



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<u>označení</u>	<u>jednotka</u>	<u>význam</u>
SCR		Selective catalytic reduction
KBO		Kautex Textron Bohemia, spol. s r.o.
NO _x		oxidy dusíku
N ₂		dusík
H ₂ O		voda
T _f	°C	teplota viskózního toku
T _m	°C	teplota tání
PE		polyethylen
EVOH		kopolymer ethylenvinylalkoholu
PP		polypropylen
PET		polyethylentereftalát
kg		kilogram
h		hodina
D		průměr (šneku)
MPa		megapascal
°C		stupeň Celsia
CO ₂		oxid uhličitý
mm		milimetr
POM		polyoxymethylen
PS		polystyren
PVC		polyvinylchlorid
PA		polyamid
atd.		a tak dále
PMMA		polymethylmethakrylát
PC		polykarbonát
%		procento
T _g	°C	teplota skelného přechodu
PTFE		polytetrafluorethylen
T _m	°C	teplota tání
Zn		zinek
Ca		vápník
O ₃		ozon
λ	nm	vlnová délka záření
nm		nanometr
λ _{max}	nm	maximální vlnová délka
UV		ultrafialové
ZnO		oxid zinečnatý
ITT		index toku taveniny
ČSN		česká státní norma
EN		evropská norma
ISO		mezinárodní norma
MFR	g/10 min	mass-flow rate (hmotnostní index toku)
MVR	cm ³ /10 min	volume-flow rate (objemový index toku)
g		gram
min		minuta
m _{nom}	kg	jmenovité zatížení
3D		3dimenzionální
cm ³		centimetr krychlový
SCR2		označení druhé výrobní linky oddělení SCR
stav k 12/2013		stav k prosinci 2013



označení	jednotka	význam
kN		kilonewton
l		litr
m ³		metr krychlový
V		volt
AC		střídavé napětí
kW		kilowatt
kWh		kilowatthodina
t		tuna
m		metr
T _{pásem}		teplota pásem
s		sekunda
n	min ⁻¹	otáčky
DIN		německá národní norma
L	m	délka
W		Watt
mg		miligram
μm		mikrometr
NMR		spektroskopie nukleární magnetické resonance
DPH		daň z přidané hodnoty
Kč		koruna česká
HDPE		vysokohustotní polyethylen
n ₂₈	min ⁻¹	28 otáček za minutu
n ₃₄	min ⁻¹	34 otáček za minutu
n ₃₈	min ⁻¹	38 otáček za minutu



1. ÚVOD

V dnešní době bychom si život okolo nás bez použití plastů již téměř nedokázali představit. Tuto synteticky vyrobenou látku používáme dennodenně a výrazně si tím usnadňujeme naši každodenní činnost. Co předchází tomu, než si plastový výrobek koupíme v obchodě, a co nastává po odložení na konci jeho životnosti, ovšem ví jen málokdo. Plasty během svého života podléhají různým vnějším i vnitřním vlivům, které zkracují jejich dobu použitelnosti a tím zvyšují nutnost potřeby vyrábět další plastové výrobky. Výrobky, kterým skončí životnost, pak mnohdy končí nejen ve zpracovných odpadu, ale i v přírodě, kterou významnou měrou destabilizují. Dobu použitelnosti těchto látek lze významně ovlivnit při jejich vlastní výrobě vhodnými podmínkami zpracování nebo přidáním různých přísad. Životnost plastových výrobků je závislá na jejich odolnosti vůči různým faktorům, které destabilizují jejich strukturu. Faktory, které způsobují degradaci polymeru a tím i jeho stárnutí, popisuje tato diplomová práce.

V teoretické části diplomové práce je popisována technologie vyfukování dutých výrobků, rozdělení polymerů a základní popis mechanismů způsobující degradaci polymerů. V praktické části se tato diplomová práce zabývá vlivem technologických podmínek při zpracování polyethylenu technologií vytlačovacího vyfukování na degradaci materiálu hotového výrobku. Výrobkem je dutá nádrž. Degradace se hodnotí zkouškou indexu toku taveniny dle ČSN EN ISO 1133. Dále je 3D měřením hodnocen vliv degradace na rozměrovou stabilitu vyfukované nádrže.

Experiment je interním zadáním závěrečné práce od firmy Kautex Textron Bohemia Kněžmost (KBO) a je prováděn při výrobě SCR nádrží technologií vytlačovacího vyfukování. Nádrže SCR (Selective catalytic reduction) jsou vyráběny monovytlačovacím vyfukováním a slouží jako nádrže pro vodný roztok močoviny do dopravních prostředků známé pod názvem Ad-Blue, která má za cíl snížit ekologickou zátěž na životní prostředí způsobenou emisemi výfukových plynů. KBO se kromě SCR nádrží zabývá také vyfukováním palivových nádrží koextruzním vyfukováním, vstřikováním nádobek pro kapalinu do ostřikovačů a okrajově také vyfukováním vzduchových rozvodů do dopravních prostředků.

Tzv. SCR systém má za úkol dopravit močovinu z SCR nádrže do prostoru katalyzátoru, kde močovina zreaguje s NO_x , přemění se na N_2 a H_2O , a tím se sníží celkové emise spalovacího motoru. Nasazuje se do nákladních a osobních prostředků s vyšším obsahem dieselového motoru, aby emise splňovaly požadovanou normu EU6. [1, 2]



2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Technologie zpracování plastů/polymerů

Pro samotné zpracování plastů je zapotřebí vložit do procesu zpracování teplo, které je možno přivést externím zdrojem nebo působením tření jednotlivých částí stroje a zpracovávané hmoty. Vlivem zvýšené teploty se materiál dostává do viskózně-tekutého stavu, schopného měnit svůj tvar. Proto se amorfní polymery zahřívají alespoň na teplotu viskózního toku T_f a krystalické plasty alespoň na teplotu tání T_m . [3, 4]

2.2 Technologie vyfukování polymerů

Diplomová práce se zabývá degradací PE při procesu vyfukování SCR nádrží, proto se zde budeme zabývat technologií vyfukování. Tato technologie umožňuje vyrábět duté výrobky velkých rozměrů, různých tvarů (lahve, konve, kanystry, nádrže, sudy atd.). Za dutý výrobek se považuje výrobek s vnitřní dutinou, ze které nelze vyjmout tuhé jádro obvyklým způsobem. U této technologie, oproti technologii vstřikování, není nutné pro vytvoření tvarové dutiny používat ve formě jádra.

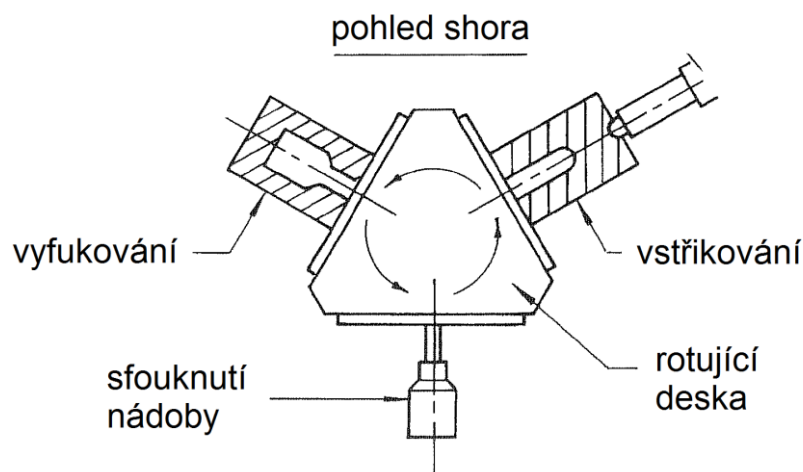
Vyfukovací proces, při kterém se z vhodného polotovaru vyfukují přetlakem vzduchu ve formě dutá tělesa, obsahuje tři části: *tavení a plastifikace materiálu*, *formování parizonu* a nakonec *vyfukování a tvarování nádoby*. Vyfukování se nejčastěji provádí třemi technologiemi:

- vstřikovací vyfukování
- vytlačovací vyfukování
- vyfukování s dloužením [3, 5, 6]

2.2.1 Vstřikovací vyfukování

Tento způsob vyfukování se používá především pro menší duté výrobky s členitým povrchem. Zde je využito klasického vstřikovacího stroje. Nejprve se ve vstřikovací formě na speciálně upravený ocelový trn nastříkne tavenina vhodného plastu. Tím vznikne předlisek, který má již hotové hrdlo a dno. Další postup záleží na výrobcu, zda má dostatečné strojní vybavení, které přenesení výlisek ještě v plastickém stavu do dutiny vyfukovací formy, kde se vyfoukne. Nebo se proces po vyrobení výlisku přeruší a další zpracování v podobě vyfukování se provádí samostatně, po určité době. Tudiž je nutné znovu ohřát výlisek, ovšem oblast hrdla se závitem se již znovu neohřívá.

Tento způsob zpracování je prakticky bez technologického odpadu, pokud je použito při vstřikování živého vtoku. Hrdlo se závitem a dno mají vysokou kvalitu, neboť neobsahují svár. Ovšem tento druh přípravy parizonu je určen pouze pro duté výrobky s hrdlem. Výhodou je možnost regulovat tloušťku stěny polotovaru rozměrem vstřikovací formy. To je zapotřebí u výrobků s proměnlivým průměrem po své délce, neboť se vyfukováním stěny výrobku v místech většího průměru více ztenčují. [4, 7]



Obr. 2.1: Princip vstřikovacího vyfukování s okamžitým vyfouknutím [7]

2.2.2 Vytlačovací vyfukování

Již podle názvu je patrné, že tavenina polymeru pro tuto technologii je dodávána z vytlačovacího stroje. Až 90 % vyfukovaných nádob připadá právě této technologii. Nejčastěji se jedná o vyfukované láhve. Natavený materiál ze šneku vytlačovacího stroje se dostává do přímé nebo šikmé vytlačovací hlavy, kde je přes hubici vytlačovací hlavy vytlačován v požadovaném množství ven do volného prostoru. Vzniklý vytlačený polotovar označovaný jako parizon uzavírá kovová dvoudílná vyfukovací forma přímo ve stroji. Parizon, nacházející se dosud v plastickém stavu, je zaškrcen ve formě a středem vyfouknut stlačeným vzduchem přes vyfukovací trn, nebo přes vyfukovací jehly. Vyfouknutím se parizon přitlačí k vnitřním stěnám formy, kde zaujme její tvar a začne se ochlazovat. Doba sevření je závislá na rychlosti ochlazení vyfukované nádoby. Následně se forma rozevře a vyfouknutá nádoba je vyhozena z formy, nebo je odebrána manipulátorem. S touto technologií výroby souvisí i vznik přetoků na nádobě, které se nakonec musí odstranit. Odstranění probíhá ručně nebo pomocí robotického zařízení. Vzniklé přetoky se mohou ihned po zpracování v recyklačním mlýně vrátit znovu do procesu tavení materiálu. [7, 8]

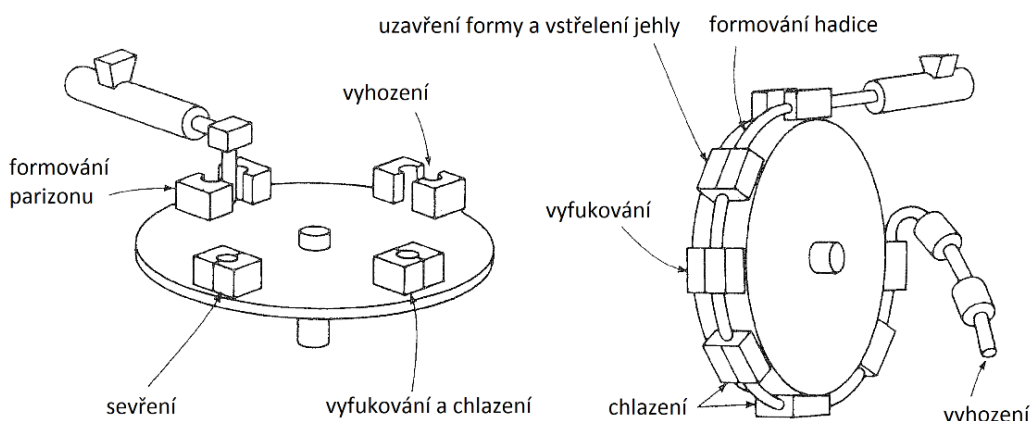
V mnoha případech může být celá sekvence výroby plně automatizovaná a přímo připojená k jinému proudu operací, jako je označení nádob, plnění nádob, dodatečné ochlazení nádoby ve vodní nádrži (rozměrné nádrže s větší tloušťkou stěny, např. palivové nádrže).

Čas cyklu vyfukování je závislý na době ochlazování nádoby ve formě. Ten je daný tloušťkou stěny nádoby, neboť polymer musí ve formě dostatečně ztuhnout, aby se po otevření formy nezdeformoval. Doba ochlazování je v řádu vteřin pro malé nádoby (1litr) až po minuty u velkých nádrží (několik desítek litrů). [7]

Kontinuální vytlačování

U tohoto způsobu výroby dutých těles probíhá vytlačování parizonu nepřetržitě. Po sevření parizonu formou se forma přesouvá do vyfukovacího stroje, aby nepřekážela dalšímu utváření parizonu pod vytlačovací hlavou. Tento způsob nazýváme *kyvadlovým systémem*, kdy si střídavě dvě formy dojíždějí pod vytlačovací hlavu pro vytlačený parizon. Další metodou odebrání parizonu může být *rotační systém*, kde jsou na vertikálním či horizontálním kole umístěny formy, které obstarávají proces sevření, vyfouknutí a chlazení parizonu viz obrázek 2.2. Posledním známým systémem je *stoupající systém*, který odebrá parizon sevřením do formy pod vytlačovací hlavou a forma odjíždí směrem dolů k vyfukovacímu stroji. Mezitím, než dojde k vyfouknutí dílu, se vytlačuje další parizon.

Kontinuální vytlačování je nejvíce výhodné pro PVC a jiné tepelně citlivé materiály podléhající rychlé tepelné degradaci. Používá se pro větší výrobní série o objemech nádoby až 3.9 litrů.



Obr. 2.2: Kontinuální vytlačování s horizontálním nebo vertikálním kolem [7]

Přerušované vytlačování

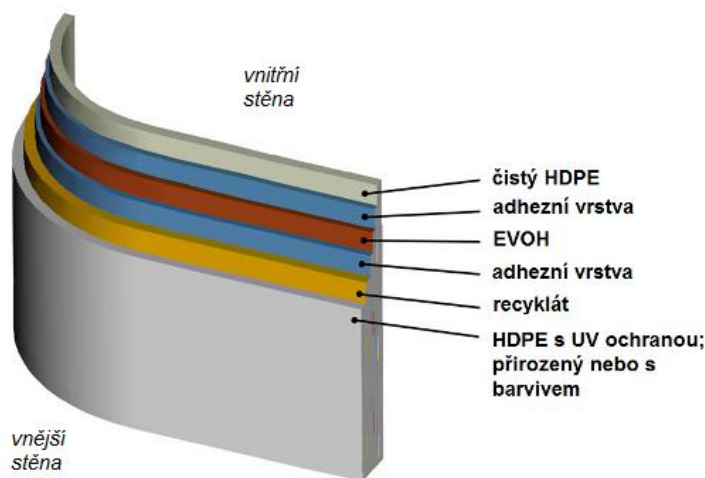
Pro tento způsob vytlačování se vždy vytvoří dostatečná zásoba nataveného polymeru pro vytlačení celé délky parizonu. Zásoba taveniny se nachází v *akumulační hlavě*, v *akumulátorovém pístu*, nebo *před čelem vytlačovacího šneku*, který koná zpětný a dopředný pohyb. Tímto způsobem se vyfukují také SCR nádrže v KBO. [7]

2.2.2.1 Koextruze

Koextruzní způsob vytlačovacího vyfukování, je specifická technologie, která umožňuje vytvářet nádoby z několika (dvě a více) jednotlivých vzájemně nepromíchaných vrstev s potřebnou odolností proti vnějším vlivům. Jednotlivé vrstvy taveniny připravené v akumulátoru vytlačovací hlavy na sebe dosednou až při samotném vytlačování plastu z hubice vytlačovací hlavy. Tím se zamezí přístupu vzduchu do spoje mezi vrstvy a je zaručena dobrá soudržnost povrchů. Pro každý materiál vytlačovaný z hlavy existuje vlastní šneková plastikační jednotka. Mezi vrstvami polymerů je vytlačováno adhezivum, zabezpečující dobrou spojitost materiálů. K vrstvení je nutno volit materiály, které spolu nebudou vzájemně interagovat. [7, 8]

Zmiňovanou odolností proti vnějším vlivům se rozumí chemická odolnost a paropropustnost obsahu nádoby vůči okolí. S výhodou se uplatňuje při výrobě obalů na potraviny nebo palivových nádrží. Průlom v technologii koextruzního vyfukování láhví přinesl v roce 1983 výrobce American Can s lahví na kečup Heinz, která se skládala z šesti vrstev PP a EVOH. [9]

S výhodou hospodárnosti se dá jako jedna vrstva nádoby použít recyklát polymeru, viz obrázek 2.3 6vrstvá stěna vyfukované palivové nádrže v KBO. Nevýhodou je, že přetoky jsou obtížně znovu zpracovatelné.



Obr. 2.3: 6vrstvá stěna vyfukované nádrže v KBO [10, 11]

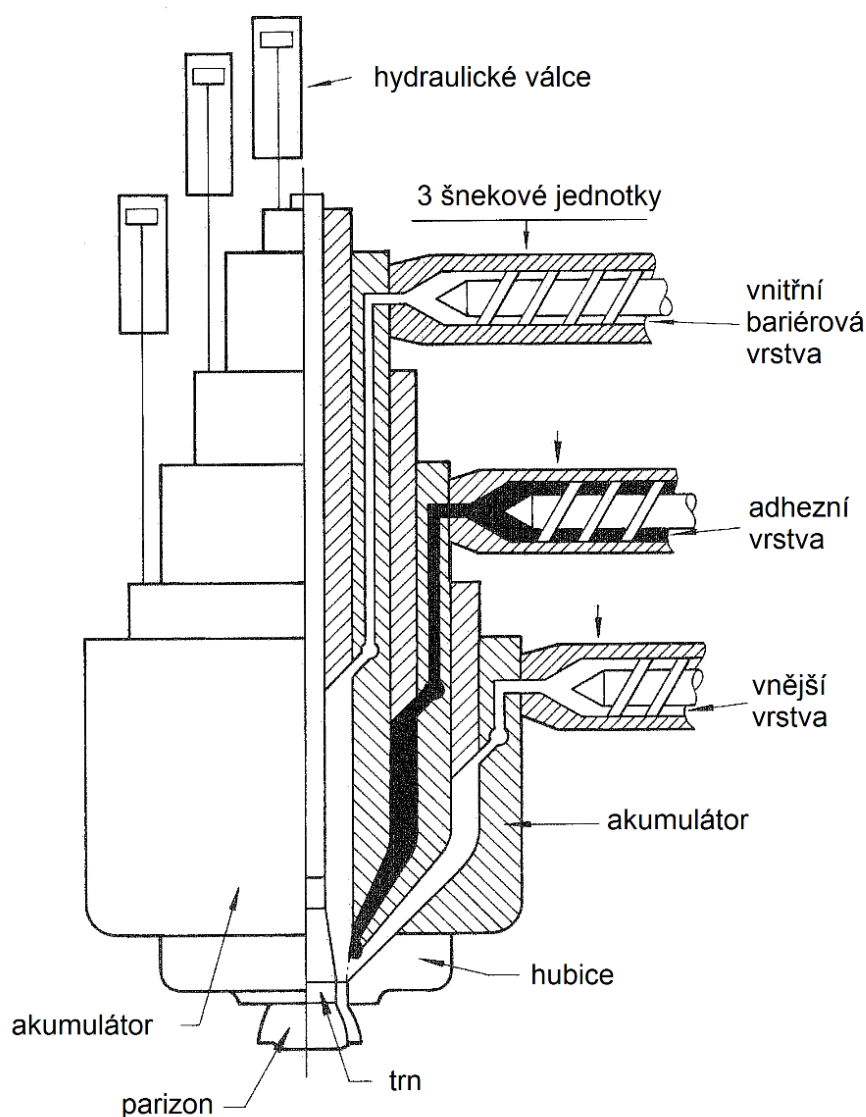


Problémy vznikající při koextruzi:

- nejednotnost vrstev – velké rozdíly ve viskoelasticitě mohou vést k zapouzdření průvlaku mezi hubicí a trnem pouze jednou vrstvou
- mezifázová nestabilita – vzniká efekt vlny vlivem vysoké viskozity nebo vysokých mezifázových smykových napětí (ZIG-ZAG nebo WAVE efekt), jde o optickou vadu s efektem „žraločí kůže“ [12]

EVOH vrstva

EVOH (kopolymer ethylenvinylalkoholu), známější pod obchodním názvem EVAL se zpracovává především koextruzním vyfukováním nebo vytlačováním, ale i vstřikováním (PET/EVOH lahve). Bariérové vlastnosti vrstvy EVOH se využívají v obalové technice pro balení potravin, kosmetických a farmaceutických produktů. Využití naleznou ale i v automobilním průmyslu při výrobě palivových nádrží. Ethylenvinylalkohol charakterizuje vysoká bariérová vlastnost vůči plynům, rozpouštědlům a chemikáliím, což umožňuje u potravin zaručit dlouhou dobu trvanlivosti a u palivových nádrží snížit propustnost par skrz stěnu nádrže do ovzduší. [13, 10]



Obr. 2.4: Koextruzní vyfukovací hlava [7]

2.2.3 Vyfukování s dloužením

Tato technologie je modifikací vstřikovacího nebo vytlačovacího vyfukování, kdy je daný předlisk/parizon před vyfouknutím ve formě temperován na vhodnou teplotu v kaučukovité oblasti (pro PP 150 až 155°C, pro PET 90 až 95°C, atd.), poté je nadloužen (naorientován) a vyfouknut. Tato technologie slouží především pro výrobu lahví o malých objemech. Dloužením lze zvýšit průhlednost, pevnost, houževnatost a snížit propustnost pro plyny a páry. [4, 7]



2.3 Stroje pro vytlačovací vyfukování

Jelikož se tato práce v praktické části zabývá vytlačovacím vyfukováním, je v této části kapitoly popsán stroj pro tuto technologii vyfukování. Celé zařízení se konstruuje jako jednoúčelové a je uloženo v rámu. Skládá se ze *šnekového vytlačovacího stroje* a z *vyfukovací jednotky*. Vyfukovací jednotka se skládá ze zavíracího a vyfukovacího mechanismu včetně formy. Stroje se rozdělují podle toho, jakým směrem se pohybuje forma (vertikální/horizontální/statické) a podle toho, zda pracují kontinuálně, nebo přerušovaně (bez zásobníku/se zásobníkem). Tyto metody jsou popsány v kapitole 2.2.2. [4, 5]

Požadavky na strojní zařízení:

- regulovatelná teplota komory (kolísání teploty taveniny má být co nejmenší)
- pro konstantní průřez parizonu bez bublin musí šnek pracovat bez pulzací
- vytlačovací hlava musí umožňovat regulaci tloušťky parizonu a snadnou výměnu hubice
- zavírací mechanismus musí umožňovat jednoduchou výměnu forem a musí udržet nástroj během vyfukování uzavřený [4]

Mezi nejvýznamnější výrobce vyfukovacích strojů patří např. GDK spol. s r.o., Ningbo KINGGLE Machinery Co., Ltd, Bekum Maschinenfabrik GmbH, Uniloy Milacron Germany GmbH, PARKER Plastic Machinery Co., Ltd. nebo Kautex Maschinenbau GmbH.

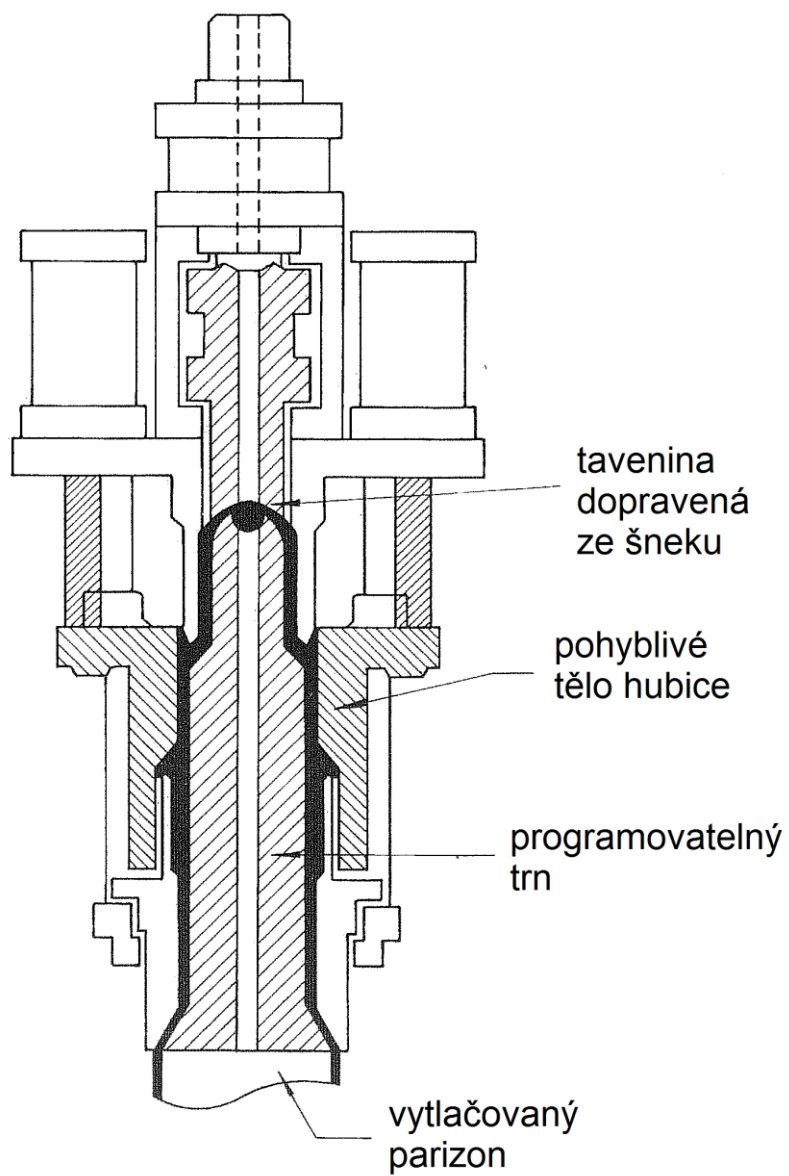
2.3.1 Vytlačovací stroj

Nejčastěji se využívá jednošnekový (do výkonu $100 \text{ kg} \times \text{h}^{-1}$), příležitostně dvoušnekový horizontální vytlačovací stroj s délkou šneku $24 \text{ až } 30 \times D$. Materiál vstupující do šneku je jím dopravován a homogenizován. Šnek je válcové těleso opatřené profilem a je uložený ve vytápěném válci. Profil šneku je určen úhlem stoupání a jeho hloubkou. Šneky mívají 3 části - dopravní, kompresní a hnětací. V první části materiál vstupuje do šneku, v kompresní části přechází do taveniny. Tyto dvě části jsou poměrně krátké, nejdelší je část hnětací, kde materiál přechází do taveniny. Charakteristika šneku je dána jeho délkou v násobku průměru závitu a kompresním poměrem. Kompresní poměr je poměr objemu materiálu v prvním chodu šroubovice vůči objemu v posledním chodu šroubovice. [4, 7, 8]



2.3.2 Vytlačovací hlava

Homogenizovaný materiál je vytlačován šnekem do akumulátoru v příčné vytlačovací hlavě s kruhovou hubicí. Mezi šnek a hlavu je vkládán lamač, který jako poslední zajišťuje dokonalou homogenizaci taveniny. Hlava je vytápěná topnými pásy a její nejdůležitější části jsou hubice a trn, které dávají vytlačovanému parizonu požadovaný tvar. Axiálním pohybem trnu ve vytlačovací hubici, nebo pohybem hubice vůči statickému trnu je možno měnit tloušťku stěny vytlačovaného parizonu. Nově lze provádět regulaci tloušťky parizonu i v radiálním směru parizonu, což umožňuje pružný kroužek umístěný mezi hubicí a trnem, jehož deformací lze měnit tloušťku parizonu pouze v požadovaných místech. Řízení tloušťky parizonu je ovládáno mikroprocesorem. Při návrhu vytlačovací hlavy je nutno věnovat pozornost narůstání objemu taveniny za hubicí vlivem stlačitelnosti plastu, stejně tak, jako protahování vytlačovaného parizonu vlivem jeho vlastní tíhy. V hlavě se nesmějí nacházet žádná mrtvá místa, kde by se tavenina hromadila a tepelně degradovala. [4, 14]



Obr. 2.5: Akumulátorová hlava [7]



2.4 Formy pro vyfukování

Formy určují konečný tvar vyfukovaného produktu. Ekvivalentů forem pro vyfukování existuje celá řada, proto se zde omezím pouze na popis formy pro vytlačovací vyfukování z parizonu. Forma je upnutá na upínacích deskách stroje, jež umožňují svým posuvem otevírání a zavírání formy. Obvykle svislá dvoudílná forma se zhotovuje z oceli, nebo slitiny berilia, hliníku nebo zinku. Nejsou zde vysoké nároky na pevnost, neboť vyfukovací forma není namáhána tak vysokými tlaky, jako formy u jiných technologií (pouze 0,5 až 1 MPa). Obě poloviny formy jsou vůči sobě uloženy vodícími kolíky a pouzdry, jejichž přesné vedení zabraňuje nežádoucím nárazům formy a urychluje vlastní zavírání. K uzavření formy dochází buď mechanickým (klíka, zuby, hřeben, páka, klíny), nebo hydraulickým způsobem. [4, 7]

Chlazení

Chlazení zajišťují vrtané vnitřní chladicí kanály v obou polovinách formy. Vyfukovaný díl by měl být co nejintenzivněji, a zároveň co nejrovnoměrněji, chlazen v celém svém objemu. V místech s větší tloušťkou stěny výrobku jsou formy vložkovány materiály s vyšší vodivostí, např. hliníkové vložky, aby nedocházelo k deformaci tvaru výrobku vlivem nerovnoměrné rychlosti tuhnutí. I jednoduchá forma má min. 2 okruhy pro chlazení, neboť parizon je u dna a hrdla silnější, proto je zde nutno chladit více, aby nedocházelo k deformaci. Jako chladicí médium se nejčastěji využívá voda z vodovodního řádu a je napojena v cirkulačním oběhu na tepelný výměník, který udržuje teplotu vody mezi 4 až 20 °C. Teplota formy se tak udržuje na teplotě 30 až 60 °C. Při této teplotě může na povrchu formy kondenzovat vzduch z okolí. V tomto případě je využito klimatizačního zařízení pro úpravu vzduchu v těsné blízkosti formy. Chladicí médium jako vodní mlha, inertní dusík či CO₂ může cirkulovat i uvnitř nádoby, urychluje se tím čas cyklu a zároveň tvoří vyfukovací tlak.

Protože doba chlazení je nejdelší částí pracovního cyklu vyfukování, používá se u strojů s velkým výkonem vícenásobná vyfukovací hlava a vícenásobná forma.

Vyfukovací trn, vyfukovací jehla

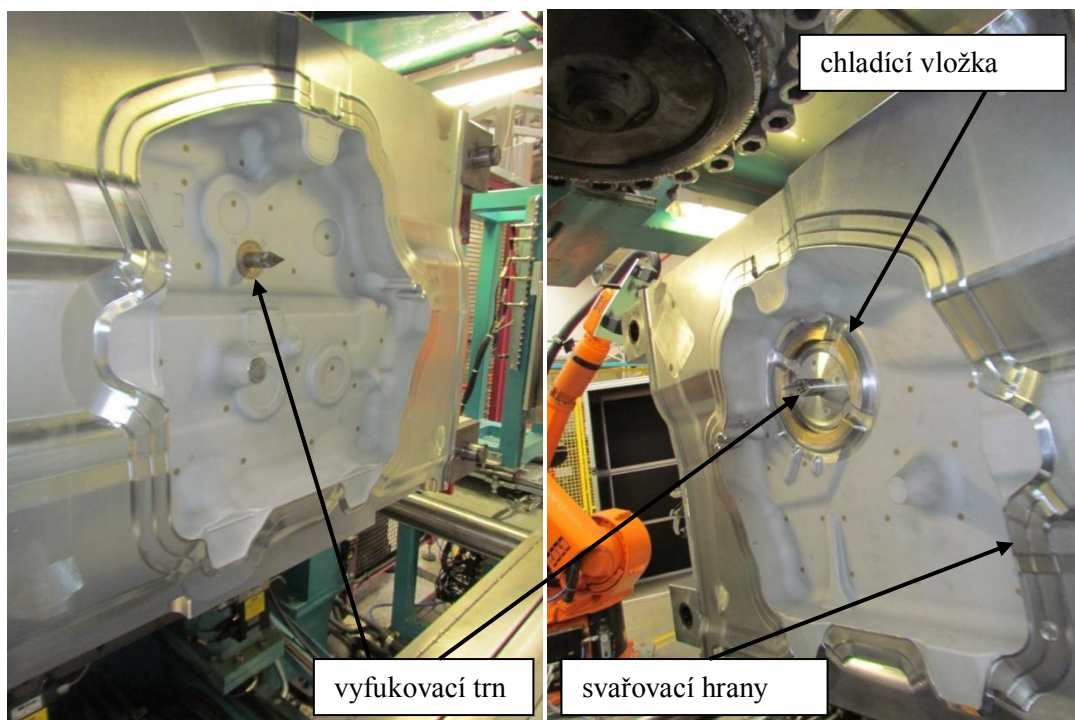
Vyfouknutí nádoby se provádí buď přes vstřelenou jehlu do stěny nádoby v místě budoucího otvoru výrobku, nebo přes vyfukovací trn ze spodu/ze shora, anebo jehlou z vytlačovací hlavy. Vyhazování hotového výrobku se děje sfouknutím ze stěny formy směrem dolů, do strany, anebo se větší díly odebírají ručně či manipulátorem. [7]

Svařovací hrany

Další, velmi důležitou částí formy jsou svařovací hrany, které musí být skloněny vůči sobě tak, aby tlačily část materiálu zpět do formy. Dosáhne se tak vysoké pevnosti svaru na obvodu formy. Pro snadné odstranění přetoků od vyfouknutého výrobku je nutné, aby po uzavření formy byla mezi svařovacími plochami mezera 0,2 až 0,5 mm vyplněná plastem. Minimální úhel mezi svařovacími hranami je 5° , ale např. úhel hran pro POM je 35 až 45° . Šířka svařovacích ploch je závislá na použitém plastu a bývá 0,2 až 3 mm.

Odvzdušnění formy

K odvzdušnění stačí většinou netěsnosti v dělicí rovině formy, nebo se provádí odvzdušňovacími štěrbinami či odvzdušňovacími válcovými vložkami se sraženou hranou, nebo šestihranem. [4, 7]



Obr. 2.6: Forma pro vyfukování



2.5 Polymery

Polymery tak, jak je známe z běžného života, se kolem nás vyskytují v tuhém stavu. Do tohoto stavu se ovšem musejí dostat určitým procesem zpracování, při kterém jsou do finální podoby tvarovány ještě v tekutém stavu. Z celkové produkce plastů tvoří asi 80% termoplasty. Sortiment termoplastů se neustále rozvíjí, jednak výrobou nových polymerů, a jednak modifikací současných polymerů.

Polymer je chemická látka obsahující ve svých makromolekulách atomy uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku, chlóru a dalších prvků, které se v jejich řetězci mnohonásobně opakují v takovém počtu, že odebráním nebo přidáním několika jejich konstitučních jednotek nezmění své vlastnosti. Polymer tedy vzniká několikanásobným opakováním původní nízkomolekulární sloučeniny, monomeru. [4]

2.5.1 Rozdělení polymerů

Plasty neboli polymery smíchané s různými přísadami lze členit do skupin.

Dělení podle původu:

- *přírodní*
 - vyrobené z přírodních produktů na bázi celulózy, kaseinu, latexu, atd.
- *syntetické*
 - vyrobené chemickou cestou

Dělení podle aplikace:

- *plasty pro široké použití*
 - patří sem polyolefiny, polystyrénové hmoty, polyvinylchlorid, fenolformaldehydové a močovinoformaldehydové hmoty
- *plasty pro inženýrské aplikace*
 - polyamidy, polykarbonáty, polyoximetylen, polymethylmetakrylát, terpolymer ABS, polyfenilénoxid, polyuretan, epoxidové a polyesterové pryskyřice
- *plasty pro špičkové aplikace*
 - např. polysulfon, polyfenylénsulfid, tetrafluoretylen, polyimidy a další.



Dělení podle teplotního chování:

➤ *termoplasty*

- jedná se o polymerní materiály, které při zahřívání přecházejí do plastického stavu, do stavu vysoce viskózních neneutronovských kapalin, kde je lze snadno tvářet a zpracovávat různými technologiemi. Do tuhého stavu přejdou ochlazením pod teplotu tání T_m (semikrystalické plasty), resp. teplotu viskózního toku T_f (amorfní plasty). Protože při zahřívání nedochází ke změnám chemické struktury, lze proces měknutí a následného tuhnutí opakovat teoreticky bez omezení. Jedná se pouze o fyzikální proces. K termoplastům patří většina zpracovávaných hmot, jako je polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyamid (PA), atd.

➤ *reaktoplasty*

- jedná se o polymerní materiály, dříve nazývané termosety, které rovněž v první fázi zahřívání měknou a lze je tvářet, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci – prostorovému zesíťování struktury, k tzv. *vytvrzování*. Výrobek je možno považovat za jednu velkou makromolekulu. Ochlazování reaktoplastů probíhá mimo nástroj, neboť zajištění rychlého ohřevu formy pro vytvrzení a následné rychlé ochlazení materiálu by bylo obtížné. Tento děj je nevratný a vytvrzené plasty nelze roztavit ani rozpustit, dalším zahříváním dojde k rozkladu hmoty (degradaci). Patří sem fenolformaldehydové hmoty, epoxidové pryskyřice, polyesterové hmoty, apod.

➤ *kaučuky, pryže, elastomery*

- jedná se o polymerní materiály, které rovněž v první fázi zahřívání měknou a lze je tvářet, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci – prostorovému zesíťování struktury, probíhá tzv. vulkanizace. U elastomerů na bázi termoplastů nedochází ke změnám chemické struktury, proces měknutí a následného tuhnutí lze opakovat teoreticky bez omezení, probíhá zde pouze fyzikální děj.



Dělení podle nadmolekulární struktury (stupně uspořádanosti):

➤ *amorfní*

- makromolekuly zde zaujímají zcela nahodilou pozici. Patří sem např. PS, PMMA, PC, apod. Jsou charakteristické svou tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností, modulem pružnosti a jsou vzhledem k nízkému indexu lomu (1,4 až 1,6) průhledné, resp. dle propustnosti světla čiré (92 % propustnosti světla), transparentní nebo průhledné (60 % propustnosti světla). Součinitel teplotní roztažnosti α je menší, než u semikrystalických polymerů. Použitelnost amorfních polymerů je do teploty zesklenní T_g .

➤ *krystalické (semikrystalické)*

- makromolekuly vykazují určitý stupeň uspořádanosti, který se označuje jako stupeň krystalinity (bývá v rozsahu od 40 do 90 %) a představuje relativní poměr uspořádaných krystalických oblastí vůči amorfním neuspořádaným oblastem. Tyto plasty se označují jako semikrystalické, neboť stupeň krystalinity nemůže nikdy nabýt 100 %. Patří sem PP, PE, PA, POM, PTFE, atd. Jsou mléčně zakalené, index lomu je větší než u amorfních plastů a jsou houževnaté. Pevnost a modul pružnosti roste se stupněm krystalinity. Použitelnost těchto plastů je do teploty tání T_m .

Dělení podle druhu přísad:

➤ *neplněné*

- množství přísad v plastu neovlivňuje vlastnosti polymerní matrice

➤ *plněné*

- *Plniva* - vyztužující (např. skleněná, kovová, uhlíková, bavlněná vlákna)
 - nevyztužující (z důvodu snížení ceny, např. kaolin, křída)

Plniva tedy zlepšují buď mechanické vlastnosti materiálu, nebo chemickou odolnost či tvarovou stálost při zvýšené teplotě, jiné prostě jen hmotu zlevňují.

- *Stabilizátory* (tepelné, světelné) jsou určeny k zpomalení degradačních procesů a zvýšení životnosti součástí
- *Maziva* (obsah do 1 %) usnadňují zpracování polymerů např. tím, že snižují viskozitu polymeru nebo zabraňují lepení výrobku na stěnu formy (např. vosky, stearáty Zn či Ca , popř. oleje a tuky)



- *Barviva* (obsah do 10 %) dávají plastům požadovaný barevný odstín. Většinou se používají barevné pigmenty založené na anorganických sloučeninách kovu (oxidy železa popř. chrómu). Organická barviva (líhové roztoky) rozpustná v polymeru se použijí tehdy, má-li hmota po vybarvení zůstat průhledná.
- *Změkčovadla* zlepšují houževnatost, zpracovatelnost a ohebnost materiálu, ovšem na úkor mechanických vlastností.
- *Tvrdidla* způsobují vznik příčných vazeb mezi makromolekulami, a tím vytvrzení.
- *Iniciátory a urychlovače polyreakcí* ovlivňují účinek tvrdidla.
- *Retardéry hoření* působí samozhášivě, zpomalují proces hoření plastů nebo vůbec nedovolí zapálení plastu.
- *Nadouvadla* jsou přidávána v malém množství (0,5 ,2 %) k základnímu materiálu a po zahřátí na zpracovatelskou teplotu se rozkládají v plynné látky vytvářející lehčené plasty.

Dělení dle struktury jednotlivých makromolekul:

- lineární makromolekuly
- rozvětvené makromolekuly
- zesítěné makromolekuly

Dělení dle chemické struktury plastů:

- polyolefiny
- styrenové plasty
- polyamidy
- polyester
- polyuretany
- akryláty
- silikony
- chloroplasty
- fluoroplasty
- deriváty celulosy [4]



2.6 Degradace polymerů

Polymery se oproti jiným látkám vyznačují vysokou odolností vůči korozi, proto jsou často využívány jako ochrana méně odolnějších materiálů. Nicméně ani plasty nejsou nedotknutelné. **Koroze** obecně způsobuje vliv především vnějších činitelů, jako je vliv okolního prostředí (povětrnostní podmínky, kyslík, ozon, sluneční záření, biologické organismy), vysoké teploty, chemická činidla, mechanické namáhání. K závažným změnám vlastností polymerů nedochází pouze při užívání výrobku, ale i při jeho výrobě v závěrečných fázích zpracování, a to především vlivem tepelných a mechanických namáhání. Zde potom tento jev označujeme **degradací**. [8]

Degradace polymerů nebo odbourávání polymerů je reakce, při níž se snižuje průměrný polymerizační stupeň polymerů. Polymerizační stupeň makromolekuly je daný počtem monomerních jednotek v makromolekule. Kromě snižování polymerizačního stupně se může měnit i konstituce strukturních jednotek polymerních řetězců. [15]

Pro molekulovou hmotnost M platí vztah [3]:

$$M = \frac{M_0}{y}$$

M ...molekulová hmotnost [–]

M_0 ...molekulová hmotnost strukturní jednotky [–]

y ...polymerační stupeň [–]

2.6.1 Depolymerizace a štěpení

Z hlediska mechanismu degradace makromolekul vlivem působení tepla, světla, ultrazvuku, mechanického namáhání, hydrolýzy nebo oxidace se rozlišují dvě možnosti: depolymerizace a štěpení řetězců.

➤ Depolymerizace

- Depolymerizace je opačná reakce výstavby makromolekul, kde se od konce řetězce makromolekuly postupně odštěpují jednotky monomeru. Snadno depolymerizují polymery v jejichž molekulách nastává pnutí vlivem objemných substituentů, např. PMMA, POM.



➤ *Štěpení*

- Štěpení řetězců nastává vlivem působení tepla a jeho opakováním dochází ke snižování polymerizačního stupně polymeru. Na rozdíl od depolymerizace nastává štěpení ve střední části řetězce, kde působí na chemické vazby při zpracování polymerů největší tahové namáhání. Vyskytuje se např. u PE. K tzv. oxidačnímu štěpení dochází, pokud je polymer za zvýšené teploty navíc vystaven neinertnímu prostředí. Tento stav nastává také při zpracování plastů ve výrobě. [1, 15]

2.6.2 Mechanizmy koroze polymerů

Reakce makromolekulárních látek jsou významně ovlivněny difúzí reakčního činidla do struktury polymeru.

Oxidace

Oxidace je charakteristická přibýváním atomu kyslíku a ubýváním atomů uhlíku v molekule. Čím více je v makromolekule dvojných vazeb, tím je molekula vůči oxidaci méně odolná. Nejvíce takových vazeb obsahují kaučuky, které bez přídavku antioxidantů podléhají oxidaci poměrně rychle. Při oxidaci dochází ke štěpení makromolekul, k síťování (při nižších teplotách a nižších koncentracích kyslíku) a ke vzniku nových funkčních skupin (tvorba aldehydů, ketonů, alkoholů, epoxidů), proto i malý rozsah oxidace polymerů způsobí podstatnou změnu jejich vlastností.

Působením UV záření, vysokých teplot a mechanického namáhání na polymer vznikají radikály, které reagují s kyslíkem a tím výrazně urychlují oxidaci. Jednotlivé reakce jsou popsány níže.

➤ *Dále oxidaci polymerů urychluje:*

- rychlost difúze kyslíku do polymeru a jeho rozpustnost v polymeru
- poměr povrchu a objemu
- defekty a nečistoty ve struktuře
- kationty přechodných kovů
- ozon O_3



Fotolýza

UV záření (λ 290–400 nm) tvořící cca 5 % dopadajícího slunečního záření je další z příčin poškození polymerů. UV záření iniciuje reakce, které jinak v temnu probíhají velmi pomalu. Každý polymer je schopný v závislosti na svém chemickém složení absorbovat světelné záření o určité vlnové délce, viz tabulka 2.1.

Tab. 2.1: Vlnové délky záření λ_{\max} které vyvolají maximální destrukci vybraných polymerů [16]

Polymer	λ_{\max} [nm]
polyestery	315
polyethyleny	300
polyvinylacetáty	méně než 280
nitráty celulózy	310
polyvinylchlorid	310 a 370

Většina světelné energie absorbovaná polymerem se spotřebovává na přechod makromolekuly do metastabilního excitovaného stavu (vyšší energetický stav). Zbytek energie může být předán další makromolekule nebo je spotřebován přeměnou v teplo, fluorescenci, nebo končí až roztržením vazby. U fotolýzy rozeznáváme primární reakce vyvolané přímým účinkem záření a sekundární reakce, tedy reakce atomů, molekul a radikálů, které vznikly primárními reakcemi. Sekundární reakce mohou potom pokračovat za nepřístupu světla, tzv. postradiační efekt.

Fotolýza probíhá pouze v povrchových vrstvách polymeru a způsobuje kromě štěpení řetězců makromolekul a síťování i přeměnu funkčních skupin nebo tvorbu nových skupin.

Fotooxidace

Fotooxidace je kombinací vlivu kyslíku a UV záření, jejichž současné působení podstatně urychluje korozi oproti účinku samotného kyslíku, nebo UV záření. V tomto případě světelné záření urychluje vznik radikálů podléhajících oxidačním reakcím. Průběh fotooxidace má potom podobný mechanismus jako oxidace.

Termooxidace

Polymery vystavené vysokým teplotám (100 °C) v atmosféře obsahující kyslík podléhají termooxidaci. Zde jako katalyzátor oxidačních reakcí působí vysoké teploty, které urychlují vznik radikálů reagujících s kyslíkem. Mechanismus termooxidace je potom opět podobný oxidaci nebo fotooxidaci.



Tepelná destrukce - pyrolýza

Chemické reakce v polymeru vzniklé účinkem vysokých teplot nelze charakterizovat určitou teplotou nebo teplotním intervalem. Tyto reakce způsobující tepelnou destrukci polymeru probíhají nejvýrazněji při vysokých teplotách řádu 100 °C, nicméně probíhají i za nižších teplot, ale jen velmi pomalu. Vzrůst rychlosti reakce je dán aktivační energií příslušných reakcí. Nelze tedy říct, jakou má polymer chemickou tepelnou odolnost, ale lze určit, jak dlouho může být nějaké teplotě vystaven, aniž by došlo k měřitelnému poškození, v závislosti na vlastnosti, která se hodnotí (např. pevnost) při daných podmínkách prostředí (záření, atmosféra, tlak apod.). Nestabilitu polymerů vůči vysokým teplotám ovlivňuje jejich zpracovatelnost.

Odolnost polymerů vůči vysokým teplotám je dána pevností kovalentní vazby mezi atomy v makromolekule.

➤ *Průběh tepelné destrukce ovlivňuje:*

- struktura polymeru
- teplota rozkladných reakcí
- čistota polymeru
- druh atmosféry

➤ *Vlivem pyrolýzy dochází k destrukci chemických vazeb v řetězcích makromolekuly, to se projeví:*

- poklesem relativní molekulové hmotnosti, případně vznikem nízkomolekulárních produktů
- vznikem příčných vazeb

➤ *Rozeznáváme obecně tři typy reakcí, ke kterým dochází při pyrolýze:*

- vznik nízkomolekulárních produktů bez zkracování řetězce makromolekuly
- náhodné štěpení řetězců
- depolymerace

Hydrolýza

Působením vody se makromolekula rozděluje na dvě části, které vznikly rozkladem molekuly vody. Na jednu se naváže hydroxylový anion a na druhou vodíkový anion. Hydrolýze podléhají polymery, které obsahují hydrolyzovatelné skupiny i polymery, u nichž tyto skupiny vznikají oxidací. Hydrolýza polymeru vede ke snížení polymerizačního stupně, a tím k poklesu relativní molekulové hmotnosti. Za normálních teplot je rychlost hydrolýzy poměrně malá, ale s rostoucí teplotou (nad 100 °C termická hydrolýza) se podstatně urychluje.



Biokoroze

V půdním a vodním prostředí způsobují korozi polymeru také biologičtí činitelé (bakterie, kvasinky, plísňe). Přírodní polymery jsou obecně zdrojem živin pro plísňe a bakterie. Syntetické polymery nejsou většinou plísněmi vyhledávány, ovšem pokud jsou znečištěny látkami, které jsou pro plísňe živinami, nezabrání plísním se po polymeru rozrůstat. Živným subjektem pro plísňe a bakterie jsou, jak látky z těsného okolí polymeru, tak i zbytky látek a přísad, obsažené v plastu z výrobního procesu (např. kasein, škrob, želatina, papír, textil, dřevěná moučka). Některé přísady mohou mít fungicidní neboli protiparazitní účinek, např. pigmenty – zinečnatá běloba ZnO.[17]

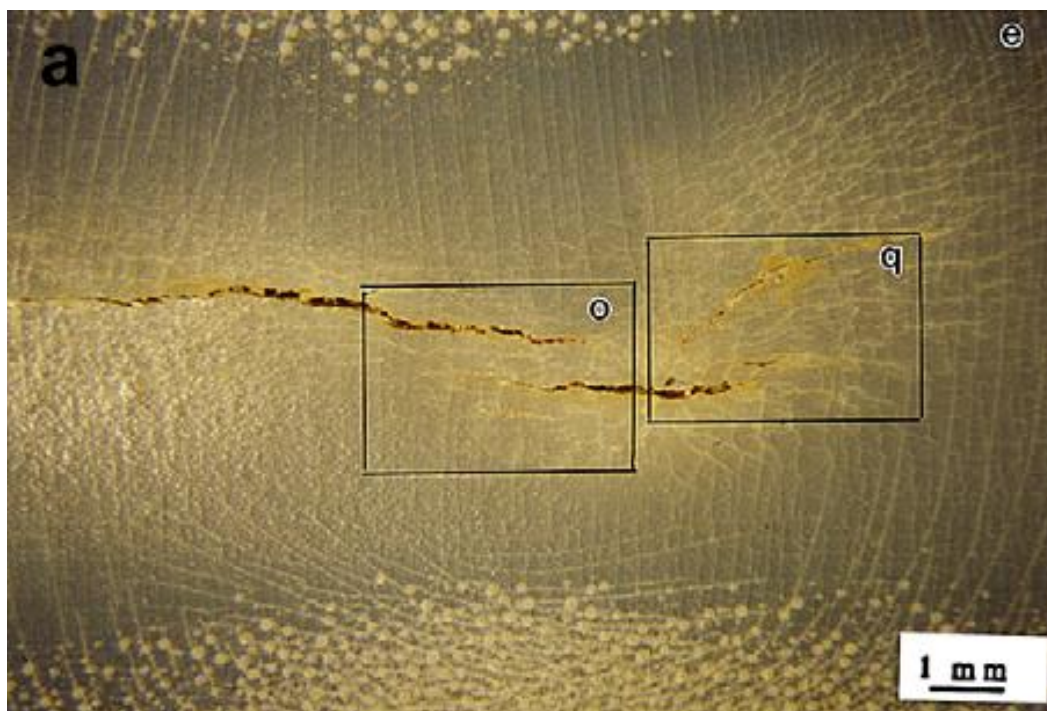
2.6.3 Faktory způsobující degradaci

Polymerní materiály jsou od svého vzniku až po konec jejich životnosti vystaveny degradaci. Ta probíhá ve dvou etapách. První etapa je krátká, ale velmi intenzivní. Probíhá ve fázi zpracování taveniny plastu ve stroji. Druhá etapa probíhá již v pevném stavu vlivem působení vnitřních (termodynamická nerovnovážnost) a vnějších vlivů, které jsou uvedeny níže.

Faktory způsobující poškození polymerů a tím ztrátu jejich užitečných vlastností:

- *teplota*
- *světelné záření*
- *kyslík*
- *voda*
- *chemické látky – organická rozpouštědla, kyseliny, zásady, roztoky solí apod.*
- *biologičtí činitelé*
- *mechanické namáhání*

Polymerní materiály nejsou při svém praktickém využití téměř nikdy vystaveny vlivu jednoho faktoru. Nejčastěji jsou vystaveny hned kombinaci vlivů hned několika faktorů, které polymer poškozuje jak chemicky, tak fyzikálně, či současně fyzikálně-chemicky. Některé kombinace faktorů mohou působit protichůdně a ve výsledku snížit míru znehodnocení materiálu. Většinou se ovšem poškození jejich kombinací zvětšuje. Příkladem kombinace tepelně-mechanicko-chemického vlivu je korozní praskání pod napětím (viz obrázek č. 2.7)



Obr. 2.7: Mikrotrhlina na vnitřní stěně polybutadienové trubky způsobená korozním praskáním [18]

Vliv kyslíku, záření, teploty a vody

Polymery vlivem kyslíku oxidují, rychlost jejich oxidace závisí na struktuře polymeru a je umocněna působením UV záření, teplotou a mechanickým namáháním.

- Nejčastěji dochází ke kombinaci vlivu **kyslíku a UV záření**. Tato oblast vlivu je popsána v kapitole 2.6.2 jako fotooxidace, proto zde pouze uvádím, že vliv těchto parametrů na degradaci polymeru je výrazný.
- Vlivem fotooxidace (**kyslík a UV záření**) při zvýšené **teplotě** se zvyšuje rychlost sekundárních reakcí (tj. reakcí atomů, molekul a radikálů, které vznikly primárními reakcemi vlivem UV záření)
- Kombinací **kyslíku a vlhkosti** se rychlost oxidace polymeru zvyšuje. Podstatou narušení polymeru je difúze vlhkosti do polymeru, kde voda zvětšuje vzdálenost mezi makromolekulami a umožňuje difúzi kyslíku do polymeru.
- Je-li polymer vystaven působení **kyslíku, vlhkosti a UV záření**, koroze polymeru se také výrazně urychlí.
- Kombinace účinku **kyslíku**, případně **ozonu** a **mechanického namáhání** oxidaci polymeru urychluje. Mechanické namáhání má aktivační vliv na makromolekulu a také může vést až k porušení povrchu polymeru. Aktivovaná makromolekula polymeru reaguje s kyslíkem, plnivem apod. K oxidaci mechanicky namáhaných



polymerů potom stačí menší aktivační energie než u polymerů, které jsou bez mechanického napětí.

- **Teplota** může vyvolávat změny chemické struktury polymeru. Ty byly již zmíněny v kapitole 2.6.2 (termooxidace, pyrolýza). Pro doplnění jen uvádím, že pokud se zvedne teplota okolí o 10 °C, zvýší se rychlost reakce dvakrát. Fyzikální účinek teploty souvisí s kolísáním teplot, které vyvolává rozměrové změny polymeru a v důsledku rozdílné objemové roztažnosti dochází k vnitřnímu pnutí v materiálu. Střídání teplot může mít také za následek změnu krystalinity polymeru.
- **Voda** působící na polymer nebo jeho přísady ve formě vlhkosti, páry, sněhu či rosy má účinek chemický (viz kapitola 2.6.2 hydrolýza), fyzikální a mechanický. Fyzikální účinek může být spojen s bobtnáním polymeru, se změnou krystalinity nebo s vyluhováním přísad polymeru, což může vést ke změnám rozměrů polymeru a nežádoucímu vnitřnímu pnutí. Pod mechanickým účinkem si můžeme představit např. opotřebení polymeru dešťovými kapkami nebo zmrznutí a roztažení vody v pórech na povrchu polymeru.

Vliv chemikálií a plynných populantů

Pronikání nízkomolekulárních chemikálií do polymeru je řízeno difúzí, která je závislá na tepelném pohybu segmentů makromolekul a na výskytu děr, vzniklých následkem pohybu těchto segmentů.

➤ *Působení chemikálií a plynů na polymer lze rozdělit na tyto části:*

- sorpce na povrchu polymeru
 - difúze do polymeru
 - fyzikální/chemická interakce s polymerem
 - difúze reakčních produktů na povrch polymeru
 - transport reakčních produktů z polymeru do okolí
- Fyzikální vliv chemikálií

Fyzikálně aktivní prostředí nezpůsobuje chemické reakce. Médium (rozpouštědlo) může ovšem difundovat do polymeru a způsobovat bobtnání polymeru a jeho přísad. Bobtnáním dochází ke změně rozměrů polymeru a může mít za následek až rozpouštění polymeru. Rozpouštědla totiž vnikají mezi makromolekuly a oddalují či přerušují jejich sekundární vazby. Nepříznivým následkem je snížení pevnosti a dielektrických vlastností polymeru. Polární rozpouštědla bobtnají polymery s polárními skupinami (-OH, -COOH



apod.), nepolární rozpouštědla naopak bobtnají nepolární polymery např. PE. Čím větší stupeň krystalinity polymer má, tím více je odolnější vůči rozpouštědlům.

- Chemický vliv chemikálií

Působení chemikálií vede k odbourávání polymerů v důsledku přetržení řetězce, síťování, změn chemické struktury i postranních skupin polymeru a jejich kombinací. Tyto reakce jsou exponenciálně umocňovány teplotou a jejich vliv ještě více roste nad teplotou skelného přechodu T_g . Odolnost polymerů vůči chemikáliím je dána chemickým složením, stupněm krystalinity, přísadami, teplotou a mechanickým namáháním. Reakcemi v polymeru vyvolané chemikáliemi jsou kyselá a alkalická hydrolýza (kyseliny, zásady), oxidace, nitrace a chlorace.

Vliv živých organismů

Tento vliv byl již popsán v kapitole 2.6.3 biokoroze. Proto ho zde pouze uvádím jako jeden z faktorů způsobující degradaci polymeru. [19]

2.7 Procesní vlivy působící na degradaci PE

Mezi hlavní procesní vlivy způsobující degradaci PE patří *teplota taveniny* a *otáčky šneku*. Otáčení šneku ve válci vytlačovacího stroje či vytlačování taveniny z vyfukovací hlavy způsobuje v tavenině smyková napětí, která polymer mechanicky namáhají a jsou příčinou zkracování makromolekul vedoucí k degradaci plastu. Čím vyšší jsou otáčky šneku, tím větší smykové namáhání na polymer působí. Důsledkem zvyšování otáček také roste teplota taveniny. Teplota procesu významně působí na taveninu jevem zvaným pyrolýza (viz kapitola 2.6.2), kdy dochází vlivem vysoké energie k destrukci chemických vazeb v řetězcích makromolekuly. Dalším důležitým faktorem je *dobu* zatížení taveniny danou teplotou, s jejímž růstem roste i míra degradace.

Z dalších faktorů, které se bezprostředně týkají procesu, má vliv na degradaci plastu také jeho sušení, mechanické namáhání během dopravy (vlasový efekt) a případná prašnost recyklátu v oběhu. PE ovšem patří mezi nenavlhavé plasty, protože jeho rovnovážná vlhkost při správném skladování je menší než 0,1 %. Prašnost recyklátu je zapříčiněna nesprávnými parametry drcení (opotřebované ozubení nožů mlýna, nevhodná zubová mezera). [20]



2.8 Současný stav použití regranulátu

V současné době se na oddělení výroby SCR v KBO využívá cca 70 % recyklátu PE vzniklého drcením v nožovém mlýně, který je součástí vyfukovacích linek. Zbylý recyklát a recyklát vzniklý mletím zmetkovitých kusů je odeslán mimo KBO. Vyfukovací linka je tvořena vyfukovacím strojem, manipulačním robotem a dochlazovacími skořepinami. Obslužné procesy zajišťují nožový mlýn, pásový dopravník do mlýna a na výstupu z linky, váha pro měření hmotnosti vyfukovaných dílů, tiskárna identifikačních kódů nádrže, nůž pro ořez přetoků a potrubí vedoucí rozemletý recyklát od mlýna do sila pomocí podtlaku z vývěvy.

Samostatné postavení v obslužném procesu má směšovací stroj Azomat 380, který zajišťuje správný poměr dávkování směsi do násypky vytlačovacího stroje. Dávka směsi, která je tvořena čistým PE, recyklátem PE a barvivem v určitém poměru, je dána programem uloženým v systému ovládacího panelu Azomatu. Každý vyráběný projekt na SCR má svůj přidělený program dávkování. Množství právě dávkovaného poměru recyklátu se mění v určitém rozmezí s tím, jak hodně je naplněné silo recyklátem. Silo je opatřeno dvěma sondami (pro min. a max. množství recyklátu v silu), které dávají signál do Azomatu pro přepnutí programu na jiný poměr dávkování.



2.9 Hodnocení tokových vlastností plastů

2.9.1 Index toku taveniny

Vzhledem k tomu, že hlavním výsledkem experimentální části má být hodnocení degradace plastu pomocí indexu toku taveniny (ITT), uvádím zde výtah z normy ČSN EN ISO 1133 (Plasty - Stanovení hmotnostního (MFR) a objemového (MVR) indexu toku taveniny termoplastů), který hodnotí tekutost plastu.

Podstatou této zkoušky je vytlačování roztaveného plastu z válce plastometru tryskou definované délky a průměru při dané teplotě a daném zatížení. Zkoušku lze provádět pouze u termoplastů nepodléhajících jevům jako je hydrolyza, kondenzace nebo síťování. Příklady zkušebních podmínek měření pro zkoušku ITT jsou uvedeny v tabulce č. 2.2. Měřenou veličinou pro tuto diplomovou práci bude objemový index toku taveniny MVR, k jehož výpočtu je třeba sledovat dráhu, kterou urazí píst za určitou dobu, nebo naopak čas potřebný k pohybu pístu po určité dráze. Naměřené hodnoty jsou udávány v $\text{cm}^3/10 \text{ min}$.

Existují i další metody k hodnocení tekutosti plastu, ale vzhledem k rozsahu práce se zde jimi nebudu zabývat. Tyto metody lze nalézt např. v literatuře [22].

➤ *Tuto zkoušku je možné využít pro:*

- **hodnocení kvality výrobního procesu** - určení míry degradace recyklátu porovnáním ITT několika srovnávaných vzorků
- **porovnání plněných a neplněných termoplastů**
- **hodnocení stejnoměrné kvality materiálu** – např. porovnání dvou šarží materiálu, nebo kontrola shody s inspekčním certifikátem [21, 22]

Tab. 2.2: Tabulka vybraných zkušebních podmínek měření pro zkoušku ITT * [21]

norma ¹	materiál	podmínky (kódové písmeno)	zkušební teplota T [°C]	jmenovité zatížení (celkové) m _{nom} [kg]
ISO 1622-2	PS	H	200	5,00
ISO 1872-2	PE	D	190	2,16
ISO 1872-2	PE	E	190	0,325
ISO 1872-2	PE	G	190	21,60
ISO 1872-2	PE	T	190	5,0
ISO 1873-2	PP	M	230	2,16

*) zkušební podmínky pro měření indexu toku taveniny jsou obvykle specifikovány v normě pro daný materiál spolu s uvedením odkazu na tuto normu



3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Cíl práce

Cílem této práce je vyhodnocení vlivu vybraných procesních parametrů vytlačovacího vyfukování na degradaci PE. Pro hodnocení míry degradace byla vybrána zkouška dle ČSN EN ISO 1133 pro hodnocení tekutosti plastu, jako relevantní zkouška, která by se měla používat v praxi pro zjištění, zda došlo nebo nedošlo k degradaci materiálu. Experimentální měření probíhalo ve firmě KBO pomocí výtlačného kapilárního viskozimetru. Vybranými procesními parametry, jejichž vliv na degradaci PE byl zjišťován, jsou teplota šneku a akumulátorové vytlačovací hlavy a otáčky šneku vytlačovacího stroje. Dalším možným vlivem vhodným pro sledování míry degradace PE ve výrobě by byl poměr recyklátu PE vůči originálnímu PE. Tento vliv ovšem nebylo možné z důvodu výrobních a časových kapacit v KBO sledovat. Pro hodnocení ITT byl odebíráán recyklát z vyfukovaných nádrží projektu BR 205US. Projekt BR 205US byl vybrán z toho důvodu, že svými rozměry zapadá do střední velikosti vyráběných nádrží ve výrobě SCR.

Druhá část experimentálního měření se týkala měření rozměrové stability zmiňovaného projektu BR 205US pomocí 3D skeneru, který rovněž patří mezi vybavení oddělení kvality v KBO.

3.2 Použitý materiál PE

K experimentu byl použit polymerní materiál PE Lupolen 4261 A Q135, který je využíván ve výrobě SCR nádrží v KBO. Jeho základní forma je bílá a k dobarvení na černou barvu se používá barvivo. Poměr množství barviva, originálu PE a recyklátu PE je dán nastavením na směšovací stroji Azomat 380. Tento materiál je určen přímo pro vytlačování a vytlačovací vyfukování. Nastavený poměr v Azomatu odpovídal poměru při standardní výrobě SCR nádrží, tedy originál PE 55 %, recyklát PE 44,94 %, barvivo 0,6 %. Základní informace o PE Lupolen 4261 A Q135 jsou zobrazeny v tabulce č. 3.1, další vlastnosti materiálu jsou v materiálovém listu v příloze č. 1.

Tab. 3.1: Tabulka základních vlastností PE Lupolen 4261 A Q135

vlastnosti materiálu	PE Lupolen 4261 A Q135
hustota	0,945 g/cm ³
pevnost v tahu	900 MPa
pevnost v tlaku	24 MPa
doporučená teplota zpracování	180 až 220 °C
MVR	5,4 až 6,8 cm ³ /10 min

3.3 Využitý vyfukovací stroj

Výroba vzorků nádrží probíhala na stroji Kingswel FT550 s interním označením FT550/4. Tento typ stroje je určen pro jednovrstvé vytlačování nádob o maximálním objemu 120 litrů. Jedná se o jednošnekový horizontální vytlačovací stroj s příčnou akumulátorovou hlavou. Zavírací mechanismus stroje umožňuje pohyb formy pouze ve směru jejího otevírání. Základní parametry stroje jsou uvedeny v tabulce č.3.2, kompletní přehled parametrů stroje je k nahlédnutí v příloze č. 2. Drcení nádrží pro odběr vzorků recyklátu ke stanovení ITT probíhalo na nožovém mlýnu Dreher, který je součástí výrobní linky SCR2 (stav SCR2 k 12/2013). Tato linka byla z důvodu volné výrobní kapacity vybrána pro tento experiment.



Obr. 3.1: Vyfukovací stroj Kingswel FT550 (interní označení FT550/4)



Tab. 3.2: Základní parametry vyfukovacího stroje Kingswel FT550

		jednotky	
uzavírací systém	uzavírací síla	kN	550
	rozevření upínacích desek	mm	600 až 1400
	rozměr desek (š × v)	mm × mm	1100 × 1100
	rychlost otevření formy	mm/s	
vytlačovací stroj	průměr šneku	mm	120
	poměr L/D	-	30:1
	plastikační kapacita	kg/h	330 (HDPE)
	počet topných pásem	-	5
vytlačovací hlava	objem zásobníku	l	12
	počet topných pásem	-	4
	max. vytlačovaný průměr	mm	350
	rychlost vytlačování		
pneumatický systém	pracovní tlak	MPa	0,6
	spotřeba vzduchu	m ³ /min	1,5
vodní chlazení	tlak vody	MPa	0,3
elektrická energie	napětí	V	AC 380V ± 10 %
	jmenovitý výkon motoru	kW	191
	průměrná spotřeba	kWh	105
vlastnosti	hmotnost	t	19
	rozměry (l × š × v)	m	7,7 × 3,5 × 5,5

3.4 Příprava vzorků pro zkoušku ITT

Pro zkoušku ITT podle ČSN EN ISO 1133 byl vždy pro každý nastavovaný procesní parametr vyfukované nádrže odebrán vzorek recyklátu přímo za sítím nožového mlýna.



Obr. 3.2: Vzorek recyklátu pro měření ITT

**Vybrané procesní parametry**

Při každém novém nastavení procesních parametrů stroje, byl vždy cyklus stroje ustálen tak, aby nastavovaná teplota a otáčky šneku byly konstantní a jejich skutečné hodnoty odpovídaly zadávaným hodnotám v ovládacím panelu stroje. Tabulka číslo 3.3 udává přehled nastavovaných parametrů a způsob označení vzorků.

➤ *Teplota*

Teplota se nastavovala pro celý proces vytlačování konstantní, to znamená, že stejná teplota byla nastavena na šneku stroje i ve vytlačovací hlavě s jedinou výjimkou pro vstupní pásmo pod násypkou, kde je teplota vždy nižší, aby nedocházelo k předčasnému natavení materiálu a ucpání násypky. Jelikož doporučený rozsah teplot pro zpracování tohoto PE je 180 až 220 °C, byl pro experiment zvolen rozsah teplot 180 až 230 °C s krokem 10 °C.

➤ *Otáčky šneku*

Pro parametr otáčky šneku byly zvoleny tři hodnoty otáček, které byly vybrány tak, aby pro nejvyšší otáčky plast nebyl příliš dlouho našnekován v akumulátorové hlavě a nečekal tak na další cyklus vyfukování. Naopak nejnižší otáčky šneku nesměly způsobovat dlouhé šnekování plastu do akumulátoru vytlačovací hlavy a příliš tak brzdit takt stroje a snižovat tím hospodárnost provozu. Zvolené otáčky byly 28 min⁻¹, 34 min⁻¹ a 38 min⁻¹. U nejnižších otáček čekal stroj na naplnění akumulátorové hlavy a spuštění cyklu přibližně 7 s. Jelikož skutečné otáčky šneku jsou závislé na viskozitě taveniny ovlivněné především třením taveniny ($T_{pásem} = \text{konst.}$) mezi šnekem a válcem šneku, kolísá jejich hodnota vlivem řízení motoru $\pm 1 \text{ min}^{-1}$. Skutečné hodnoty procesních parametrů teplot a otáček jsou uvedeny v příloze č. 3.

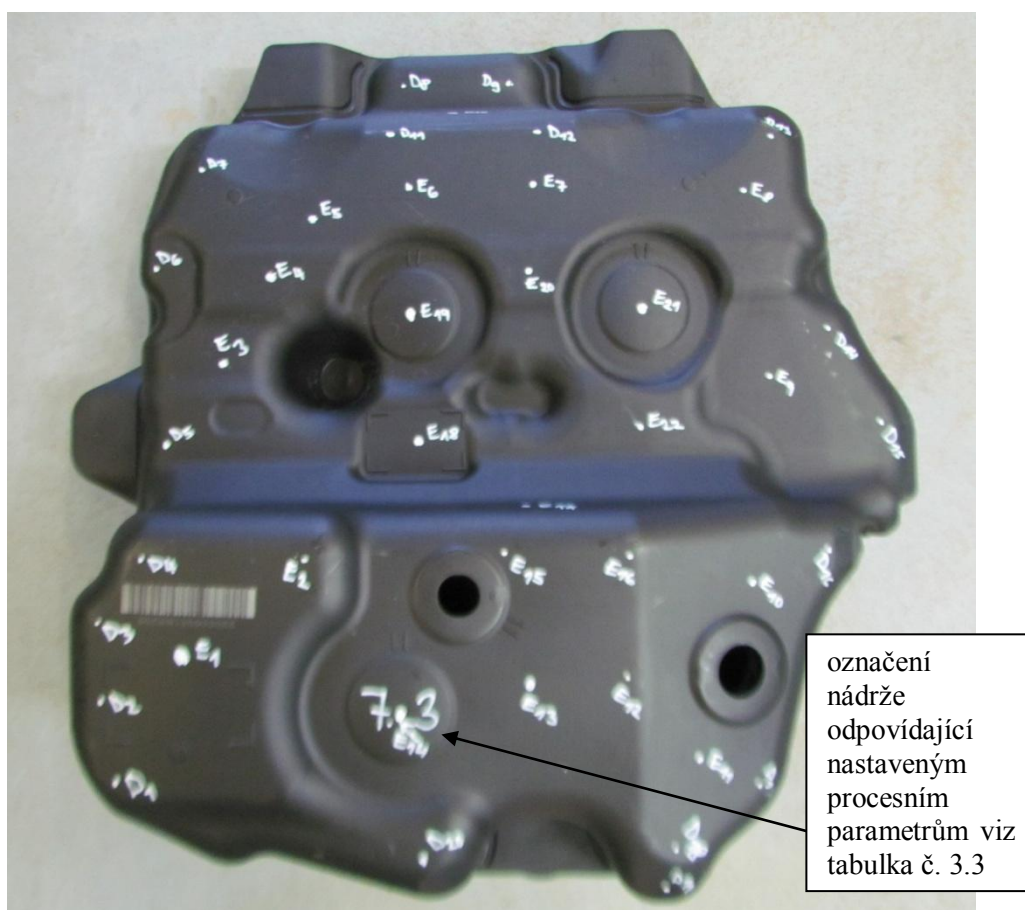
Tab. 3.3: Tabulka označení vzorků recyklátu pro zkoušku ITT a vzorků vyfukovaných nádrží pro měření rozměrové stability pomocí 3D skeneru

	n [min ⁻¹]	číslo vzorku					
T [°C]	×	180	190	200	210	220	230
n ₁	28	2.1	3.1	4.1	5.1	6.1	7.1
n ₂	34	2.2	3.2	4.2	5.2	6.2	7.2
n ₃	38	2.3	3.3	4.3	5.3	6.3	7.3

3.5 Příprava vzorků nádrží pro zkoušku měření rozměrové stability

Při každém jednotlivém nastavení parametrů vyfukování na vyfukovacím stroji byla odebrána a označena vždy jedna nádrž pro měření 3D skenerem a vyhodnocení rozměrové nepřesnosti. Vyfouknutá nádrž byla odebrána podávacími nůžkami ven z prostoru formy, kde ji přebral robot. Následně byla nádrž zvážena z důvodu kontroly správné hmotnosti dílu a ochlazená v dochlazovací skořepině na pozici číslo 1. Pro doplnění uvádím, že vzorek recyklátu pro zkoušku ITT byl odebírán vždy z následující vyfouknuté nádrže, která prošla stejným procesem výroby i chlazení a poté recyklací v nožovém mlýně.

Na vzorové nádrži (Obrázek 3.3) bylo po konzultaci s technologem KBO vybráno několik předpokládaných problematických bodů, které byly předmětem sledování, k určení rozměrové stability procesu. Celkem bylo na nádrži označeno 76 bodů značených písmeny A, B, C, D, E postupně v kružnicích od obvodu nádrže směrem ke středu a jejich indexy v podobě číslic, viz příloha č. 4.



Obr. 3.3: Označená nádrž pro měření rozměrové stability vyfukované nádrže



3.6 Zkouška ITT

Výtlačný kapilární plastometr Göttfert MP-D

Plastometr Göttfert MP-D (obrázek číslo 3.4) se používá ke stanovení indexu toku taveniny. Způsob měření tohoto zařízení odpovídá normě ČSN EN ISO 1133 a zařízení je schopno zhotovovat hmotnostní (MFR) i objemový (MVR) index toku taveniny. Pro účely této diplomové práce byl hodnocen objemový index toku taveniny. Základní parametry zařízení jsou uvedeny v následujícím přehledu.

obecné informace

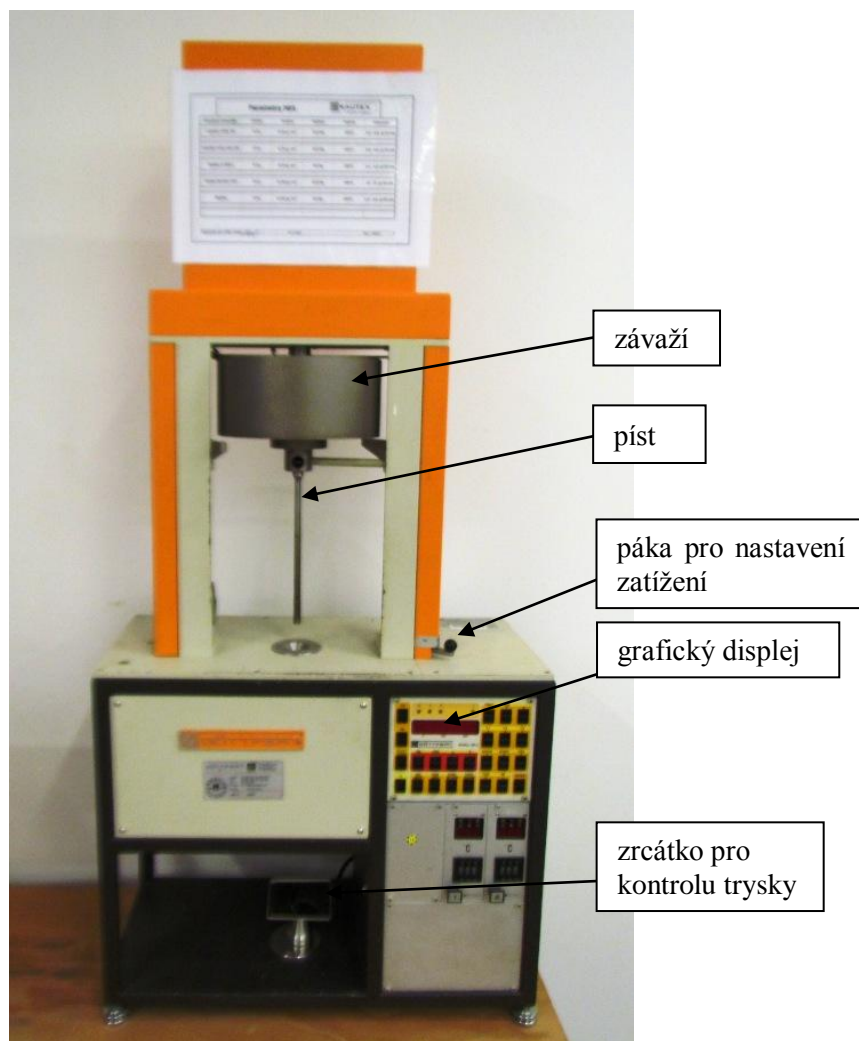
- měření podle DIN EN ISO 1133
- automatické měření MVR
- 6 zatěžovacích závaží: 1,20; 2,16; 3,80; 5,00; 10,00; 21,6 kg
- rozsah měření (hodnoty MVR): teoreticky od 0,03 do 500 cm³/10 min
prakticky využitelné od 0,1 do 250 cm³/10 min

zkušební válec

- průměr zkušebního kanálu válce: 9,5 mm
- rozměr trysky: L = 8 mm, D = 2,1 mm
- 2 elektricky vytápěné topné okruhy
- největší teplotní odchylka vytápěného válce: 0,5 °C
- rychlounavěšovací držák trysky
- 2 termočlánky Pt100 DIN
- délka zkušebního kanálu válce: 175 mm
- materiál trysky: Wolfram – Karbid

pohon

- jednofázový asynchronní motor s kondenzátorem
- výkon: 150 W
- 6místný displej
- 24 tlačítek s tlakovým senzorem



Obr. 3.4: Výtlačný kapilární plastometr Göttfert MP-D



Váha Sartorius AC 211 S k odměření hmotnosti vzorků

Laboratorní váha Sartorius AC 211 S s přesností $\pm 0,1$ mg slouží k naměření přesné hmotnosti vzorku recyklátu plastu.



Obr. 3.5: Laboratorní váha Sartorius s miskou pro navážení recyklátu

obecné informace

- rozsah vážení maximálně 210 g
- přesnost 0,1 mg
- linearita $\pm 0,2$ mg
- hmotnost kalibračního závaží 150 g
- třída kalibračního závaží E2
- možnost interní kalibrace [23]

3.6.1 Provedení zkoušky ITT podle ČSN EN ISO 1133

Pracovní postup při měření tekutosti odebraných vzorků recyklátu z nádrží projektu BR 205US byl proveden podle interního pracovního postupu, který odpovídá normě ČSN EN ISO 1133.

**Podmínky měření**

Pro materiál PE Lupolen 4261 A Q 135 jsou výrobcem plastu předepsány podmínky měření uvedené v tabulce č. 3.4.

Tab. 3.4: Tabulka podmínek měření pro PE Lupolen 4261 A Q 135

materiál	PE Lupolen 4261 A Q135
teplota válce	190°C
zatížení pístu	21,6 kg
hustota PE	0,76 g/cm ³
hmotnost vsázky PE	4,5 g ± 1 g
čas přehřevu	4 min

Pracovní postup

Nejprve se na plastometru nastaví teplota pracovního válce na předepsaných 190 °C, zatížení 21,6 kg a hustota PE při dané teplotě (0,76 g/cm³). Po vyhřátí válce se ponechá válec na této teplotě alespoň 15 minut. Válec, píst a tryska musí být dokonale vyčištěny, teprve poté se vloží odměřené množství plastu do válce a pýchovací tyčkou se upěchuje tak, aby ve sloupci granulí recyklátu nebyly vzduchové bubliny. Poté se spustí měření, které začíná zasunutím nezatíženého pístu do válce a 4 minutovým přehřevem plastu. Mezitím se kontroluje aktuální teplota válce na displeji plastometru. Po uplynutí doby přehřevu se na píst automaticky spustí nastavené zatížení a začne samotné měření. Plastometr průběžně zaznamenává hodnoty tekutosti plastu a na konci měření zobrazí na displeji průměrnou hodnotu tekutosti plastu v cm³/10 min. Tu jsem zaznamenal. Před dalším měřením vzorků je nutné plastometr opět dokonale vyčistit od vytlačované taveniny plastu.

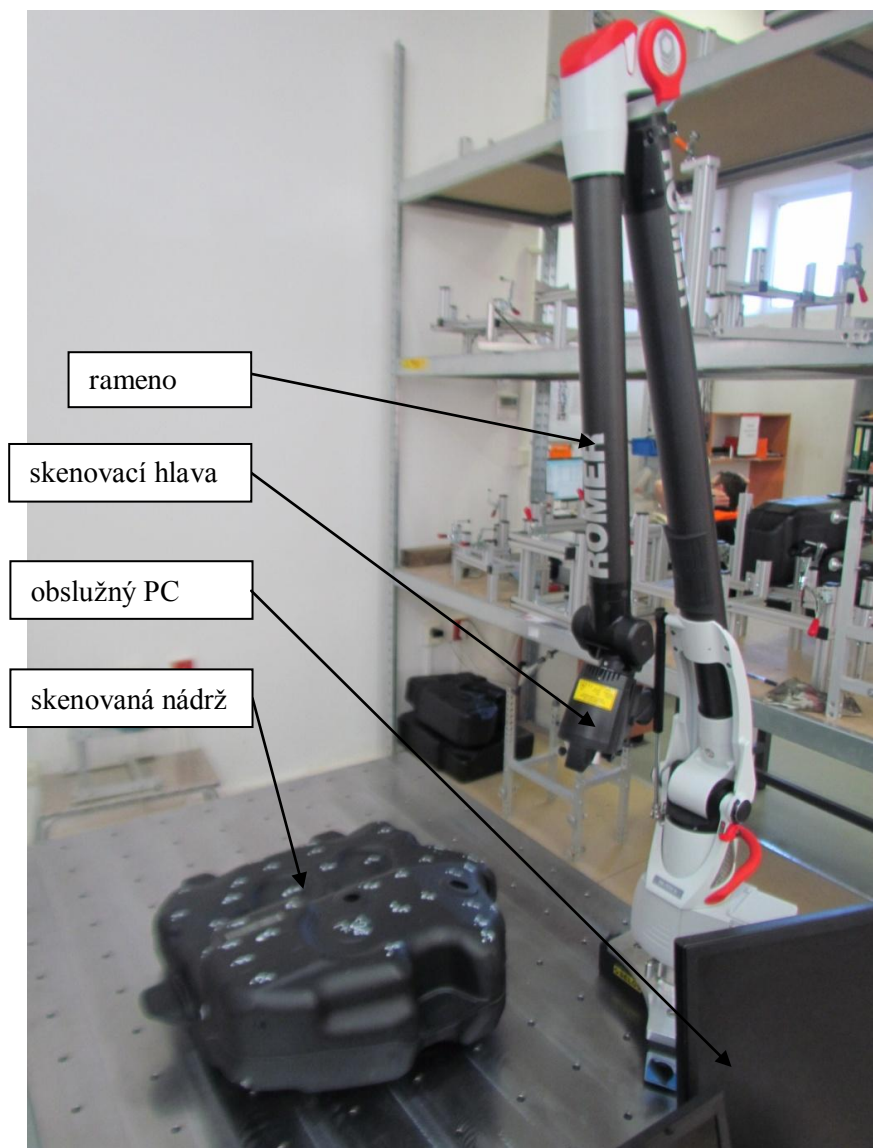
3.7 Měření rozměrové stability vybraného dílu

Měření rozměrové stability nádrže probíhalo pomocí 3D skeneru s měřícím ramenem *Romer Absolute Arm RA – 7330 SI* na 18 zhotovených nádržích projektu BR 205US. Měřením na 3D skeneru je zjišťována odchylka od etalonu. Etalonem je v těchto případech brán 3D model nádrže od zákazníka. Tolerance odchylky pro vyfukované díly v KBO je ± 5 mm.

3D skener *Romer Absolute Arm RA – 7330 SI*

Měřící rameno *Romer Absolute Arm RA – 7330 SI* s integrovaným skenerem RS2 je univerzální a certifikovaný systém laserového řádkového skeneru dle normy B89.4.22. Umožňuje vysokorychlostní skenování všech typů dílů, prototypů, reverzní inženýrství atd. Vyhodnocení výsledků měření probíhá na PC v programu PolyWorks. V KBO slouží toto zařízení ke skenování odchylek vyráběných dílů od jejich požadované hodnoty dané 3D

modelem. S použitím kuličkové sondy je možno provádět také snímání vybraných bodů ve 3D prostoru. Základní informace o měřícím systému jsou uvedeny v přehledu níže, podrobné informace jsou v příloze č. 5.



Obr. 3.6: Skenovací zařízení Romer

obecné informace – rameno Romer Absolute Arm

- 7osé snímání a skenování
- absolutní snímače polohy v rameni
- měřicí rozsah 3 m
- opakovatelnost bodu měření 0,079 mm
- prostorová přesnost snímání 0,100 mm
- přesnost skenovacího systému 0,119 mm
- hmotnost ramene 8,9 kg
- provozní teplota 0 °C – 50 °C



integrovaný skener RS2

- max. počet sejmutých bodů 50 000 bodů/s
- počet bodů na řádek 1000
- šířka řádku 65 mm
- pracovní vzdálenost 150 mm \pm 50 mm
- přesnost 30 μ m
- hmotnost 340 g
- třída laseru 2M
- provozní teplota 5 °C – 40 °C [24]

3.7.1 Provedení zkoušky rozměrové stability

Samotné měření probíhalo v laboratoři kvality v KBO na výše popisovaných nádržích v kapitole 3.5.

Podmínky měření

Před započítím 3D skenování byly nádrže projektu BR 205US temperovány na teplotu 21 °C. Teplota okolí při 3D skenování byla dána vnitřní teplotou laboratoře kvality, která činí 21 °C \pm 1°C.

Pracovní postup

Měřicí rameno je vybaveno absolutními snímači, které přiřadí absolutní hodnotu každé poloze ramene, tudíž není nutné žádná inicializace zařízení. Po spuštění měřícího zařízení a ustavení nádrže na měřicí stůl započalo 3D skenování. Spuštění skenování se provádí stlačením tlačítka na rukojeti skenovací hlavy. Ručním naváděním skenovací hlavy se oskenovala celá vnější plocha nádrže. Průběh 3D digitalizace je ihned pro kontrolu zobrazován na monitoru obslužného PC. Tím je možno okamžitě reagovat na případné vzniklé chyby skenování a doskenovat nedokonalé tvary ploch. Vybraných 76 bodů ze vzorové nádrže na obrázku 3.3 bylo sejmuta kuličkovou sondou a uloženo v paměti programu pro vyvolání i u dalších vzorků nádrží. Výsledek byl zaznamenán a zpracován do protokolu za pomoci softwaru PolyWorks. Protokol obsahuje 3D digitalizovaný snímek nádrže spolu s odchylkami požadovaných bodů od 3D modelu pro vyhodnocení rozměrové nepřesnosti.



4. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

4.1 Výsledky zkoušky ITT

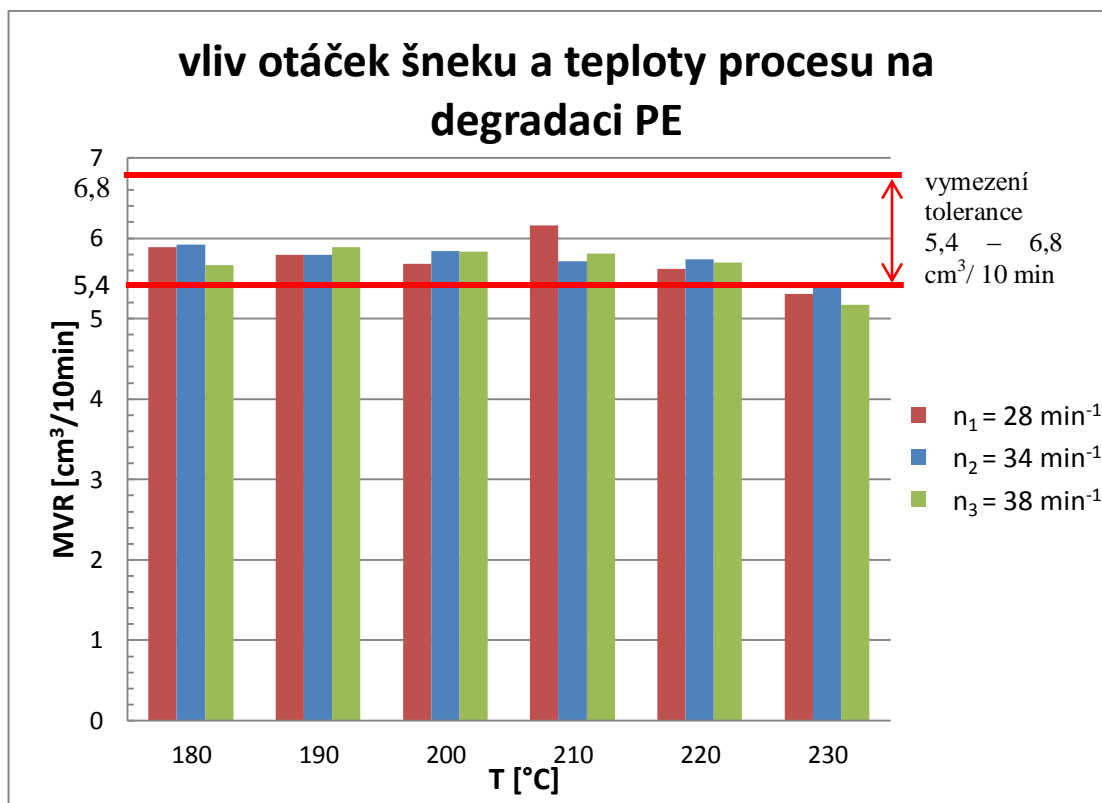
V této části kapitoly jsou uvedeny výsledky zkoušky ITT dle ČS EN ISO 1133 pro vzorky recyklátu odebrané z vyfukovaných nádrží o různých procesních parametrech projektu BR 205US vyráběného v KBO na lince SCR2. Celkem bylo pro 18 kombinací jednotlivých procesních parametrů odebráno 18 vzorků granulí recyklátu rozemletého v nožovém mlýně, který je součástí výrobní linky. Výsledné hodnoty objemového indexu toku taveniny byly naměřeny na kapilárním výtlačném plastometru fy. Göttfert.

4.1.1 Vyhodnocení výsledků zkoušky ITT dle ČSN EN ISO 1133

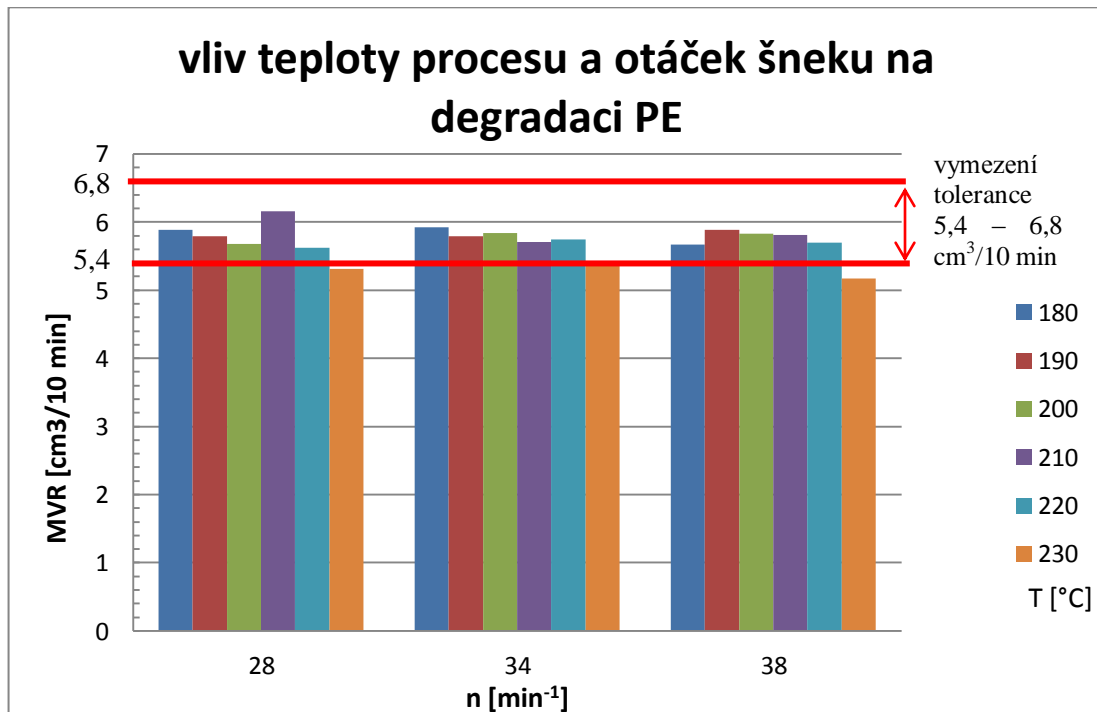
V tabulce 4.1 jsou uvedeny naměřené průměrné hodnoty MVR [$\text{cm}^3/10 \text{ min}$] z plastometru. Na obrázku 4.1 a 4.2 jsou zobrazeny grafy s výsledky naměřených průměrných hodnot. Protokol z měření je v příloze č. 6.

Tab. 4.1: Tabulka naměřených průměrných hodnot objemového indexu toku taveniny

	n [min^{-1}]	MVR [$\text{cm}^3/10\text{min}$] (číslo vzorku)					
T [$^{\circ}\text{C}$]	×	180	190	200	210	220	230
n ₁	28	5,89 (2.1)	5,79 (3.1)	5,68 (4.1)	6,16 (5.1)	5,62 (6.1)	5,31 (7.1)
n ₂	34	5,92 (2.2)	5,79 (3.2)	5,84 (4.2)	5,71 (5.2)	5,74 (6.2)	5,39 (7.2)
n ₃	38	5,67 (2.3)	5,89 (3.3)	5,83 (4.3)	5,81 (5.3)	5,70 (6.3)	5,17 (7.3)



Obr. 4.1: Graf vlivu otáček a teploty procesu na degradaci PE



Obr. 4.2: Graf vlivu teploty a otáček na degradaci PE

**Vyhodnocení zkoušky ITT – vliv procesních parametrů na degradaci**

Z naměřených hodnot zkouškou ITT je vidět, že v rozsahu teplot doporučených ke zpracování PE (180 až 220 °C) nedochází k vychýlení naměřených hodnot mimo toleranci MVR (5,4 až 6,8 cm³/10 min) danou výrobcem. K vychýlení hodnot z tolerance dochází pouze při zkoušených teplotách 230 °C, kde se naměřené hodnoty MVR pohybují pod spodní hranicí tolerance 5,4 cm³/10 min. Jedná se o hodnoty všech tří nastavovaných otáček, pro n_1 je odchylka 0,09 cm³/10 min, pro n_2 0,01 cm³/10 min, pro n_3 0,23 cm³/10 min. Při porovnání všech naměřených hodnot v grafu je možné říci, že při nejvyšší zkoušené teplotě 230 °C je MVR nižší než u ostatních teplot řádově o desetiny. Z průměrných výsledků MVR naměřených na kapilárním výtlačném plastometru lze usuzovat, že vlivem vybraných parametrů nedošlo k degradaci recyklátu PE. Vzhledem k tomu, že s rostoucí teplotou taveniny a rostoucími otáčkami, se kterými se zároveň zvyšuje i smykové tření v tavenině, se hodnoty MVR nemění, naopak při teplotě 230 °C změřená průměrná hodnota MVR klesá, usuzují, že metoda ITT není vhodná pro posuzování vlivu procesních parametrů na degradaci materiálu. Naměřené výsledky tedy nekorespondují s praxí ověřenou skutečností, že zvyšující se teplota a otáčky šneku vytlačovacího stroje při zpracování plastu mají vliv na zkracování délky makromolekul polymeru, což následně souvisí s jejich větší tekutostí, která se měřením na kapilárním výtlačném plastometru nepotvrdila.

Jelikož hodnoty MVR naměřené na kapilárním výtlačném plastometru *Göttfert MP – D* nedisponují směrodatnou odchylkou, nedá se v podstatě zcela přesně říci, zda bylo v experimentu dosaženo nějakého rozdílu mezi naměřenými hodnotami. To jen potvrzuje moji první myšlenku uvedenou výše, že měření ITT (tím spíše na výtlačném zařízení *Göttfert MP – D*, používaném v KBO) není vhodná metoda pro hodnocení degradace plastu při vytlačovacím vyfukování.

Pro zvolený rozsah teplot a otáček jsem předpokládal, že se bude měnit ITT a bude patrný vliv těchto parametrů na degradaci recyklátu PE. Po zhodnocení výsledků usuzují, že zvolený rozsah teplot nebyl nejvhodnější pro to, aby se projevila zjevná degradace.



4.2 Výsledky zkoušky rozměrové stability

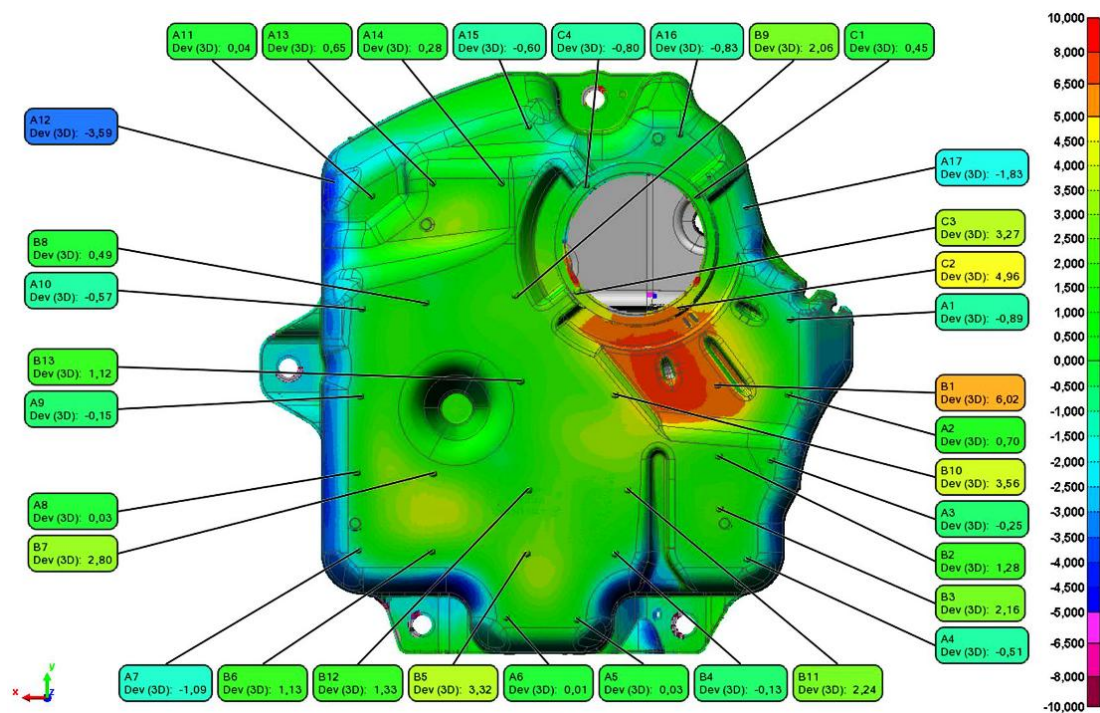
V této části kapitoly se nachází zhodnocení výsledků 3D měření rozměrové stability. Skenováním byly naměřeny odchylky daných bodů všech 18 nádrží zhotovených vytlačovacím vyfukováním o daných procesních parametrech (teplota, otáčky šneku).

4.2.1 Vyhodnocení výsledků rozměrové stability

Vyhodnocení 3D měření rozměrové stability se dá pojmut několika způsoby. Je možno vytvořit závislost jednotlivých odchylek bodů na procesních parametrech, čímž by vzniklo ze 76 měřených bodů 76 grafů po 18 vynesenech hodnotách. Dále je možno vyhledat největší odchylky u každé nádrže zvlášť, což by nedávalo smysl, vzhledem k jejich náhodnému výskytu.

Cílem této části práce je ovšem vyhodnotit vliv degradace na rozměrovou stabilitu vyfukované nádrže. Jelikož se měřením ITT nepodařilo určit vliv nastavovaných procesních parametrů teploty a otáček na degradaci PE, nelze tudíž ani určit vliv degradace na rozměrovou stabilitu. V opačném případě, pokud by se projevil vliv degradace měřením pomocí ITT, dala by se např. daná oblast odchylek 3D měření přisuzovat právě vlivu degradace.

Naměřené výsledky ukazují na možnost analýzy rozměrové stability nádrže v závislosti na teplotě procesu vytlačovacího vyfukování. Toho by se dalo využít pro praxi. Jelikož podmínky chlazení všech nádrží při jejich vyfukování a dochlazování byly po celou dobu stejné, tak by případná naměřená odchylka měla být dána pouze vlivem měněných parametrů (otáčky šneku nebo teplota šneku a vyfukovací hlavy). K tomuto závěru lze dojít pouze tehdy, pomineme-li možný vliv degradace, který se nám nepodařilo zjistit. Rozpracování vlivu teploty na stabilitu nádrže ovšem není vzhledem k množství naměřených hodnot v rozsahu této práce možné, ani není zadáním této práce. Lze ho však v budoucnu zpracovat pro potřeby KBO. Příklad výsledku 3D měření je na obrázku č. 4.3. Další protokoly jsou přiloženy v příloze a kompletní dokumentace je obsahem přiloženého CD.



Obr. 4.3: Výřez obrázku z protokolu 3D měření vzorku 2.1



5. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Vzhledem k tomu, že nebylo možno, oproti původním plánům, uskutečnit měření degradace v závislosti na poměru recyklátu PE k čistému PE, které by umožnilo vyčíslení přímých nákladů na výrobu, rozhodl jsem se na základě výsledků práce, kdy nebyla zjištěna degradace recyklátu měřením ITT na plastometru, doporučit některé další měřicí metody, kterými lze míru degradace PE stanovit.

Například spektroskopií nukleární magnetické resonance (NMR) lze určit strukturní defekty makromolekul. Tuto metodu měření nabízí např. výzkumná organizace Polymer Institute Brno, spol. s r.o. Cena měření není uvedena.

Další možností měření degradace může být měření povrchového lesku vyfukovaného výrobku. Jako příklad uvádím leskoměr Novo-Gloss (orientační cena s DPH 29 900 Kč), který je určen pro měření lesku na povrchových vrstvách různých materiálů včetně plastů.



6. ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo experimentální měření vlivu vybraných procesních parametrů vytlačovacího vyfukování na degradaci recyklátu PE a vyhodnocení vlivu degradace na rozměrovou stabilitu vyfukované SCR nádrže vybraného projektu BR 205US vyráběného ve firmě Kautex Textron Bohemia, spol. s r.o. (KBO). V rešeršní části je pojednáno o základních způsobech vyfukování s detailnějším popisem vytlačovacího vyfukování a koextruze. Dále jsem se zabýval degradací polymerů, konkrétně mechanismy degradace polymerů a jejich příčinami (vlivy).

Pro praktickou část byla vybrána jako relevantní zkouška pro měření degradace recyklátu PE zkouška indexu toku taveniny (ITT) dle ČSN EN ISO 1133 a pro vyhodnocení rozměrové stability bylo provedeno měření 3D skenováním. Obě tato měření proběhla v KBO.

Vybranými parametry pro sledování vlivu degradace byla teplota taveniny a otáčky šneku vytlačovacího stroje. Teplota procesu byla nastavena pro celý proces vytlačování a vyfukování na konstantní hodnotu postupně na 180 °C, 190 °C, 200 °C, 210 °C, 220 °C a 230 °C, pokaždé pro 28 min⁻¹, 34 min⁻¹ a 38 min⁻¹ otáček. U těchto parametrů, jež zasahují svými hranicemi mimo teploty zpracování doporučené výrobcem polymeru, jsem předpokládal, že dojde k měřitelnému nárůstu degradace. Pro výše uvedená měření bylo tedy vyfouknuto 18 vzorků nádrží a za stejných podmínek odebráno 18 vzorků recyklátu z nožového mlýna, kde byly neodebrané nádrže drceny.

Měření ITT probíhalo na výtlačném kapilárním plastometru dle normy ČSN EN ISO 1133 – metody B, kde výsledkem je objemový index toku taveniny (MVR). Z výsledků naměřených touto metodou vyplývá, že nedošlo k degradaci materiálu, neboť hodnoty MVR měřeného HDPE jsou v toleranci dané výrobcem plastu. Výjimkou je hodnota MVR pro nejvyšší zkoušenou teplotu 230 °C, kdy jsou hodnoty pro všechny otáčky dokonce nižší (pro n_{28} byla naměřena odchylka $-0,09 \text{ cm}^3/10 \text{ min}$, pro n_{34} $-0,01 \text{ cm}^3/10 \text{ min}$, pro n_{38} $-0,23 \text{ cm}^3/10 \text{ min}$.) než tolerance (5,4 až 6,8 cm³/10 min). Tato skutečnost neodpovídá teorii danému předpokladu, že s rostoucí teplotou a rostoucím smykovým namáháním taveniny daným zvyšujícími se otáčkami nastává nárůst degradace. Jelikož plastometr udává pouze průměrnou hodnotu bez směrodatných odchylek, není možné ani o odchylce hovořit.

Z naměřených výsledků ITT lze vyvodit závěr, že pro měření vlivu procesních parametrů vyfukování (teplota taveniny, otáčky šneku) na degradaci PE není zkouška ITT vhodná. Z důvodu nerelevantních hodnot ITT nelze stanovit vliv degradace na rozměrovou stabilitu vyfukovaného dílu.

Závěrem bych dodal, že pro podobný způsob měření degradace polymeru bych příště volil větší rozsah teplot a otáček, a to i takových, které již nezaručují zhotovení dokonalého



výrobku (např. otáčky v rozsahu 20 až 70 min⁻¹, teploty v rozsahu 170 až 250 °C). Také bych volil další způsoby určení míry degradace, např. měření lesku leskoměrem nebo mechanických vlastností (výroba tělíska pro tahovou zkoušku z recyklátu PE).



SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HAGEN, Vladislav. *Únava a stárnutí materiálu*. 2. vydání. VUT Brno: SNTL, 1981, 76 s.
- [2] BAUER, Stephan, Hong ZHANG, Andreas PFEIFER a Klaus WENZ. SIEMENS AG, Siemens VDO Automotive Regensburg. *Diesel Engine for Passenger Car and EU6: Entirely System Approach for Development of Fuel Injection System, Air/EGR Path and Emission Aftertreatment* [online]. [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: http://bioage.typepad.com/greencarcongress/docs/Tech_Paper_Vienna_2007_FI_NAL_20070427_EN.pdf
- [3] KREBS, Josef. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. 1. vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1991, 250 s.
- [4] LENFELD, Petr. *Technologie II*. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009, 138 s. ISBN 978-80-7372-467-2.
- [5] ŠAFAŘÍK, Miloslav. *Nástroje pro tváření kovů a plastů*. 1. vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1987, 227 s.
- [6] TOMIS, František. *Základy gumárenské a plastikářské technologie*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1980, 278 s.
- [7] LEE, Norman C. *Blow molding design guide*. Munich: Hanser, 1998, 212 s. ISBN 1-56990-227-5.
- [8] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-617-6
- [9] *Plastics Technology: Multi-Layer Blow Molding*. [online]. 2005 [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: <http://www.ptonline.com/articles/no-29---multi-layer-blow-molding>
- [10] *Multi-Layer Co-Extrusion* [online]. [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: <http://www.agriindustrialplastics.com/epa-fuel-tanks/multi-layer-co-extrusion/>
- [11] *Ultra - Low Permeation fuel tanks* [online]. [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: <http://www.walbro.com/media/39709/MLT%205-8-13.pdf>
- [12] VLACHOPOULOS, John a David STRUTT. *The Role of Rheology in Polymer Extrusion*. Hamilton: McMaster University, Polydynamics, Inc [online]. [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: <http://www.walbro.com/media/39709/MLT%205-8-13.pdf>



- [13] LANGTHALER, Jan. *Bariérové vlastnosti kopolymer u ethylenvinylalkoholu EVOH*. VOŠ obalové techniky a Střední škola Štětí. [online]. [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: http://www.odbornaskola.cz/joomla/images/stories/bari rov_vlastnosti_kopolym eru_ ethylenvinylalkoholu_evoh.pdf
- [14] FEUERHERM. *Die tools for optimum wall thickness control in extrusion blowmoulding* [online]. [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: <http://www.feuerherm-pwds.de/index.php/home.html>
- [15] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007, 207 s. ISBN 978-80-7080-662-3.
- [16] DOLEŽEL, Břetislav. *Odolnost plastů a pryží*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981, 207 s.
- [17] KUČEROVÁ, Irena. VŠCHT. *Polymerní materiály: Mechanizmy koroze polymerů* [online]. [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze_materialu_pro_restauratory/kadm/pdf/3_1.pdf
- [18] CHOI, Byoung-Ho, Alexander CHUDNOVSKY, Rajesh PARADKAR, William MICHIE, Zhenwen ZHOU a Pak-Meng CHAM. *Polymer Degradation and Stability: Experimental and theoretical investigation of stress corrosion crack (SCC) growth of polyethylene pipes*. 2009, s. 859-867. ISSN 0141-3910. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391009000226>
- [19] KUČEROVÁ, Irena. VŠCHT. *Polymerní materiály: Faktory způsobující korozi a degradaci polymerů* [online]. [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze_materialu_pro_restauratory/kadm/pdf/3_2.pdf
- [20] BĚHÁLEK, Luboš. *Navlhavost a sušení plastů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Intech. [online]. [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Suseni.pdf>
- [21] ČSN EN ISO 1133. *Plasty - Stanovení hmotnostního (MFR) a objemového (MVR) indexu toku taveniny termoplastů*. 2006.
- [22] BĚHÁLEK, Luboš. TUL, Intech. *Reologietavenin termoplastů v průmyslové praxi*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Intech. [online]. [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Reologie.pdf>
- [23] DATA WEIGHING SYSTEMS, Inc. *Sartorius AC 211 S Service Information* [online]. [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: <http://sartorius.dataweigh.com/service/product/ac-211-s/>



- [24] HEXAGON METROLOGY. *Romer Absolute Arm* [online]. [cit. 2014-01-02]. Dostupné z: http://apps.hexagon.se/downloads123/hxrom/romer/general/brochures/ROMER%20Absolute%20Arm_brochure_cs.pdf



SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Princip vstřikovacího vyfukování s okamžitým vyfouknutím	12
Obr. 2.2: Kontinuální vytlačování s horizontálním nebo vertikálním kolem	13
Obr. 2.3: 6vrstvá stěna vyfukované nádrže v KBO	14
Obr. 2.4: Koextruzní vyfukovací hlava	16
Obr. 2.5: Akumulátorová hlava	19
Obr. 2.6: Forma pro vyfukování	21
Obr. 2.7: Mikrotrhlina na vnitřní stěně polybutadienové trubky způsobená korozním praskáním	31
Obr. 3.1: Vyfukovací stroj Kingswel FT550 (interní označení FT550/4)	37
Obr. 3.2: Vzorek recyklátu pro měření ITT	38
Obr. 3.4: Výtlačný kapilární plastometr Göttfert MP-D	42
Obr. 3.5: Laboratorní váha Sartorius s miskou pro navážení recyklátu	43
Obr. 3.6: Skenovací zařízení Romer	45
Obr. 4.1: Graf vlivu otáček a teploty procesu na degradaci PE	48
Obr. 4.2: Graf vlivu teploty a otáček na degradaci PE	48
Obr. 4.3: Výřez obrázku z protokolu 3D měření vzorku 2.1	51



SEZNAM TABULEK

Tab. 2.2: Tabulka vybraných zkušebních podmínek měření pro zkoušku ITT *	35
Tab. 3.1: Tabulka základních vlastností PE Lupolen 4261 A Q135	36
Tab. 3.2: Základní parametry vyfukovacího stroje Kingswel FT550	38
Tab. 3.3: Tabulka označení vzorků recyklátu pro zkoušku ITT a vzorků vyfukovaných nádrží pro měření rozměrové stability pomocí 3D skeneru	39
Tab. 3.4: Tabulka podmínek měření pro PE Lupolen 4261 A Q 135	44
Tab. 4.1: Tabulka naměřených průměrných hodnot objemového indexu toku taveniny	47



SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Materiálová data Lupolen 4261 A Q 135

Příloha 2: Parametry vyfukovacího stroje FT550

Příloha 3: Tabulka nastavovaných a skutečných parametrů procesu

Příloha 4: Protokol 3D měření

Příloha 5: Specifikace měřicího ramene Romer Absolute Arm RA – 7330 SI s integrovaným skenerem RS2

Příloha 6: Protokol z měření ITT recyklátu na výtlačném kapilárním plastometru



Příloha 1.1

Materiálová data Lupolen 4261 A Q 135

Lupolen 4261 A Q 135

High Density (HMW) Polyethylene
LyondellBasell Industries



IDES | Prospector

ides.com/prospector

Technical Data

Product Description

Lupolen 4261 A Q135 is a high molecular weight high density polyethylene (HDPE). Typical customer applications include automotive fuel tank applications. It is supplied in powder form and is stabilized with antioxidants for the extrusion process. The product features an outstanding Environmental Stress Cracking Resistance (ESCR), good chemical resistance in combination with an excellent low temperature impact resistance. Typical processes include blow molding and thermoforming.

Lupolen 4261 A Q135 is not intended for use in medical and pharmaceutical applications.

General

Material Status	• Commercial: Active		
Literature ¹	<ul style="list-style-type: none"> • Processing - Mold Shrink (English) • Processing - PE Films (English) • Processing - Polyolefin Injection Molding Guide (English) • Technical Datasheet (English) 		
Search for UL Yellow Card	<ul style="list-style-type: none"> • LyondellBasell Industries • Lupolen 		
Availability	<ul style="list-style-type: none"> • Africa & Middle East • Asia Pacific 	<ul style="list-style-type: none"> • Europe • Latin America 	<ul style="list-style-type: none"> • North America
Additive	• Antioxidant		
Features	<ul style="list-style-type: none"> • Antioxidant • Good Chemical Resistance 	<ul style="list-style-type: none"> • High ESCR (Stress Crack Resist.) • High Impact Resistance 	<ul style="list-style-type: none"> • Low Temperature Impact Resistance
Uses	• Fuel Tanks		
Forms	• Powder		
Processing Method	• Extrusion	• Extrusion Blow Molding	• Thermoforming

Physical	Nominal Value Unit	Test Method
Density	0.945 g/cm ³	ISO 1183
Apparent Density	0.49 g/cm ³	ISO 60
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (190°C/21.6 kg)	6.0 g/10 min	ISO 1133
Environmental Stress-Cracking Resistance	1000 hr	ASTM D1693B
FNCT ³ (80°C)	3.3 day	ISO 16770
Mechanical	Nominal Value Unit	Test Method
Tensile Modulus	900 MPa	ISO 527-2
Tensile Stress (Yield)	24.0 MPa	ISO 527-2
Tensile Strain (Yield)	10 %	ISO 527-2
Impact	Nominal Value Unit	Test Method
Tensile Impact Strength		ISO 8256/1B
-30°C	170 kJ/m ²	
23°C	250 kJ/m ²	
Thermal	Nominal Value Unit	Test Method
Melting Temperature (DSC)	131 °C	ISO 3146
Extrusion	Nominal Value Unit	
Melt Temperature	180 to 220 °C	

Notes

¹ These links provide you with access to supplier literature. We work hard to keep them up to date; however you may find the most current literature from the supplier.

² Typical properties: these are not to be construed as specifications.

³ 3.5 MPa, 2% Igepal BC/9



Příloha 1.2

Lupolen 4261 A Q 135

High Density (HMW) Polyethylene

LyondellBasell Industries



Where to Buy

Supplier

LyondellBasell Industries

Wilmington, DE USA

Telephone: 713-309-7200

Web: <http://polymers.lyondellbasell.com/portal/site/basell/>

Distributor

Ultrapolymers

Ultrapolymers is a Pan European distribution company. Contact Ultrapolymers for availability of individual products by country.

Telephone: +32-11-57-95-57

Web: <http://www.ultrapolymers.com/>

Availability: Belarus, Belgium, Bosnia and Herzegovina, Bulgaria, Croatia, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Macedonia, Netherlands, Norway, Portugal, Romania, Serbia, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Turkey, United Kingdom



Příloha 2

Parametry vyfukovacího stroje FT550

Outline	Machine Model	Unit	FT150/FT150R	FT250/FT250R	FT350	FT550
	Station Type		Single station / Double station	Single station / Double station	Single station	Single station
	Max. Volume of Products	L	15	25	60	120
	Product Type		Single-layer product	Single-layer product	Single-layer product	Single-layer product
Clamping System	circle time	S / 个	8	8.5	—	—
	Clamping Force	KN	150		350	550
	Platen opening stroke	mm	660	960	400-1050	600-1400
	Platen Dimensions(W × H)	mm × mm	670 × 480	680x675	950 × 900	1100 × 1100
Extrusion System	Screw Diameter	mm	75/90	90/100	90	100
	Screw Length/Dia. Ratio		30:1	30:1	30:1	30:1
	Plasticizing Capacity	Kg/h	100 /180(HDPE)	180/ 270(HDPE)	180(HDPE)	270(HDPE)
	Heating Zone		4	4/5	4	5
	Heating Power	KW	6 × 4=24/5.4 × 4=21.6	5.4 × 4=21.6/6 × 5=30	5.4 × 4=21.6	
	Driving Power	KW	45/55	55/90	55	90
Die Head System	Die Head Type		Single-layer	Single-layer	Single-layer	Single-layer
	Accumulator volume	L	—	—	8	12
	Head Heating Zone		13	2/14	4	4
	Head Heating Power	KW	21	2/21	22	30
	diameter of Max. die	mm	180	220	300	350
Hydraulic System	Rated Flow of Large Pump	L/min.	221	221	160	187
	Rated Flow of Small Pump	L/min	85	85	42	42
	Hydraulic Motor Power	KW	30+18.5	30+18.5	30	37
Pneumatic System	Air Source Pressure		0.7	0.7	0.7	0.7
	Work Pressure	Mpa	0.6	0.6	0.6	0.6
	Air Consumption	M ³ /min	2.0	2.5	1	1.5
Water Supply	Water Supply Pressure	Mpa	0.3	0.3	0.3	0.3
Electrical Power	Power Voltage	V	AC380V ± 10%	AC380V ± 10%	AC380V ± 10%	AC380V ± 10%
	Frequency	HZ	50	50	50	50
	Connecting Cable		Three box of four-wire systems	Three box of four-wire systems	Three box of four-wire systems	Three box of four-wire systems
	Total Rated Power	KW	135	181	135.6	191
	Average Energy Consumption	KWh	77	97	78	105
Description	Weight	ton	16	18	15	19
	Machine Dimensions(L × W × H)	m	7 × 7 × 4.2	7.4 × 6.9 × 4.2	6.6 × 3.1 × 4.7	7.7 × 3.5 × 5.5



Příloha 3.1

Tabulka nastavovaných a skutečných parametrů procesu

	pásmo šneku		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	pásmo hlavy		1	2	3	4	5	6	7		
požadovaná teplota [°C]	číslo vzorku	zadané / skutečné otáčky šneku [min ⁻¹]									
			teplota pásma [°C]								
180	2.1	28/28	50	192	184	188	207	182	179	181	186
			180	179	180	180	179	179	184		
	2.2	34/33	49	182	179	178	194	180	181	180	180
			180	180	180	178	178	179	183		
	2.3	38/38	51	185	183	183	199	182	180	181	180
			179	179	180	178	179	180	182		
190	3.1	28/28	51	192	191	191	196	188	191	191	191
			190	189	191	189	188	188	192		
	3.2	34/34	49	191	192	193	198	190	191	191	190
			191	191	191	191	191	191	191		
	3.3	38/38	49	193	192	193	202	191	191	191	190
			191	191	191	191	191	191	191		
200	4.1	28/28	50	202	199	200	205	201	200	200	200
			201	200	200	200	200	200	201		
	4.2	34/33	48	209	202	202	206	200	200	200	200
			201	200	200	201	200	200	200		
	4.3	38/38	48	200	200	200	206	200	200	200	200
			200	200	200	200	200	200	200		







Příloha 3.2

	pásmo šneku		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	pásmo hlavy		1	2	3	4	5	6	7		
požadovaná teplota [°C]	číslo vzorku	zadané / skutečné otáčky šneku [min ⁻¹]									
			skutečná teplota pásma [°C]								
210	5.1	28/28	50	201	207	205	207	208	211	211	210
			212	211	211	211	211	209	212		
	5.2	34/34	50	204	209	208	216	207	211	211	210
			212	211	211	211	211	210	210		
	5.3	38/38	58	213	215	214	218	210	209	211	210
			211	211	211	211	211	211	210		
220	6.1	28/28	51	213	218	218	220	214	221	221	221
			221	220	221	220	220	219	221		
	6.2	34/34	51	216	221	220	222	215	221	221	220
			221	221	221	221	221	221	221		
	6.3	38/37	48	224	224	223	221	218	221	220	220
			221	221	221	221	222	221	221		
230	7.1	28/28	49	213	228	226	226	227	231	231	231
			231	231	231	231	230	229	221		
	7.2	34/34	50	219	229	228	230	229	231	231	230
			232	229	231	232	231	231	233		
	7.3	38/37	51	230	232	231	231	232	230	231	230
			232	229	231	232	232	231	230		



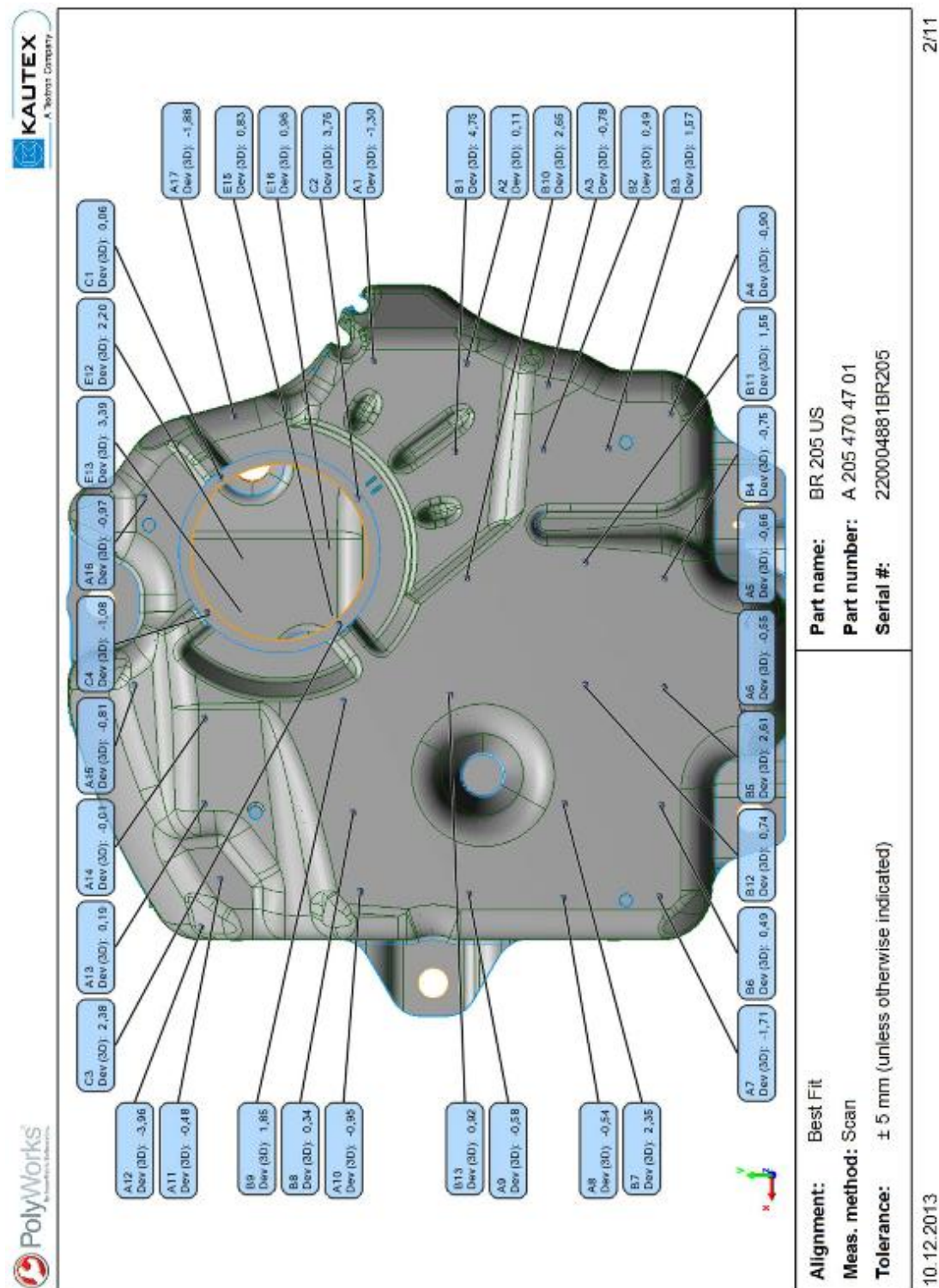
Příloha 4.1

Protokol 3D měření na zařízení
Romer Absolute Arm RA – 7330 SI s integrovaným skenerem RS2
vzorek 2.1

	<p>BR 205 US Report Author: Baumruk Patrik Date: 10.12.2013</p>
<div data-bbox="331 405 443 824"><p>KAUTEX A Textron Company</p></div> <div data-bbox="480 1323 1182 2002"></div> <div data-bbox="628 577 1038 994"></div>	
<p>Organization: Kautex Textron Bohemia, spol. s r.o. Operator: Baumruk Patrik Measuring method: Scan Device: Romer Absolute Arm RA-7330 SI</p>	<p>Part name: BR 205 US - Pozice 2.1 Part number: A 205 470 47 01 Serial #: 220004881BR205 Tolerance: ± 5 mm (unless otherwise indicated in drawing)</p>

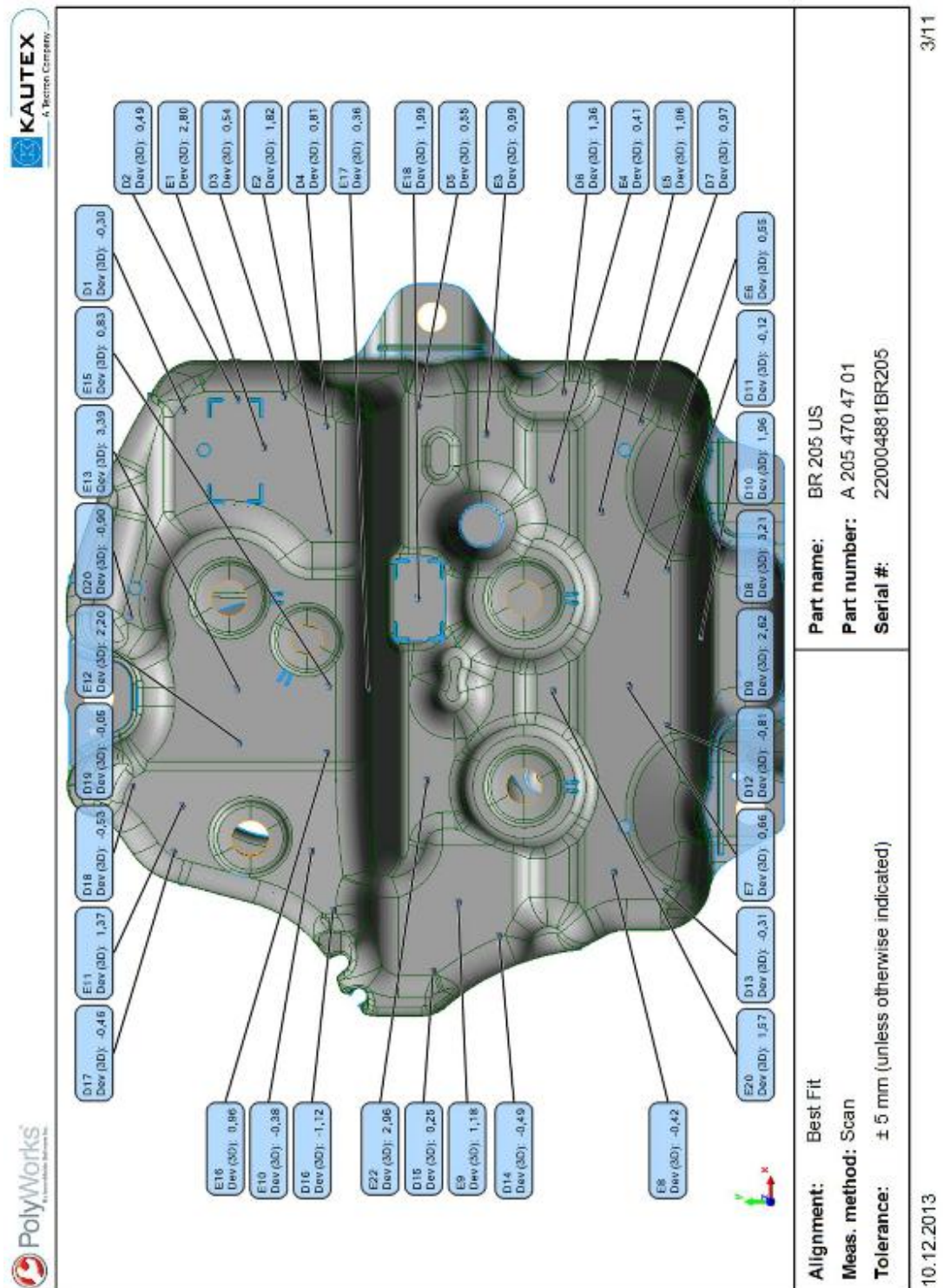


Příloha 4.2



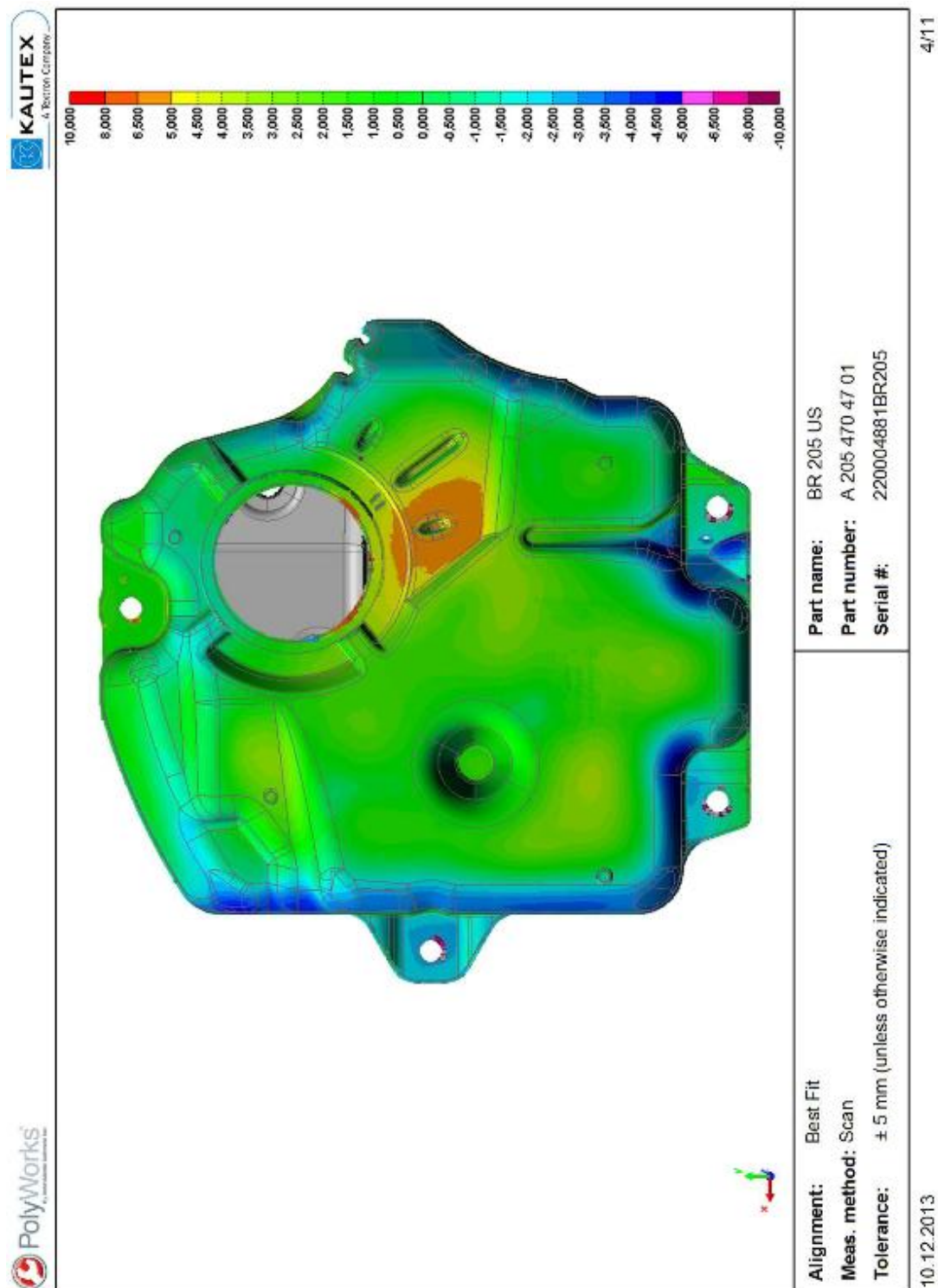


Příloha 4.3



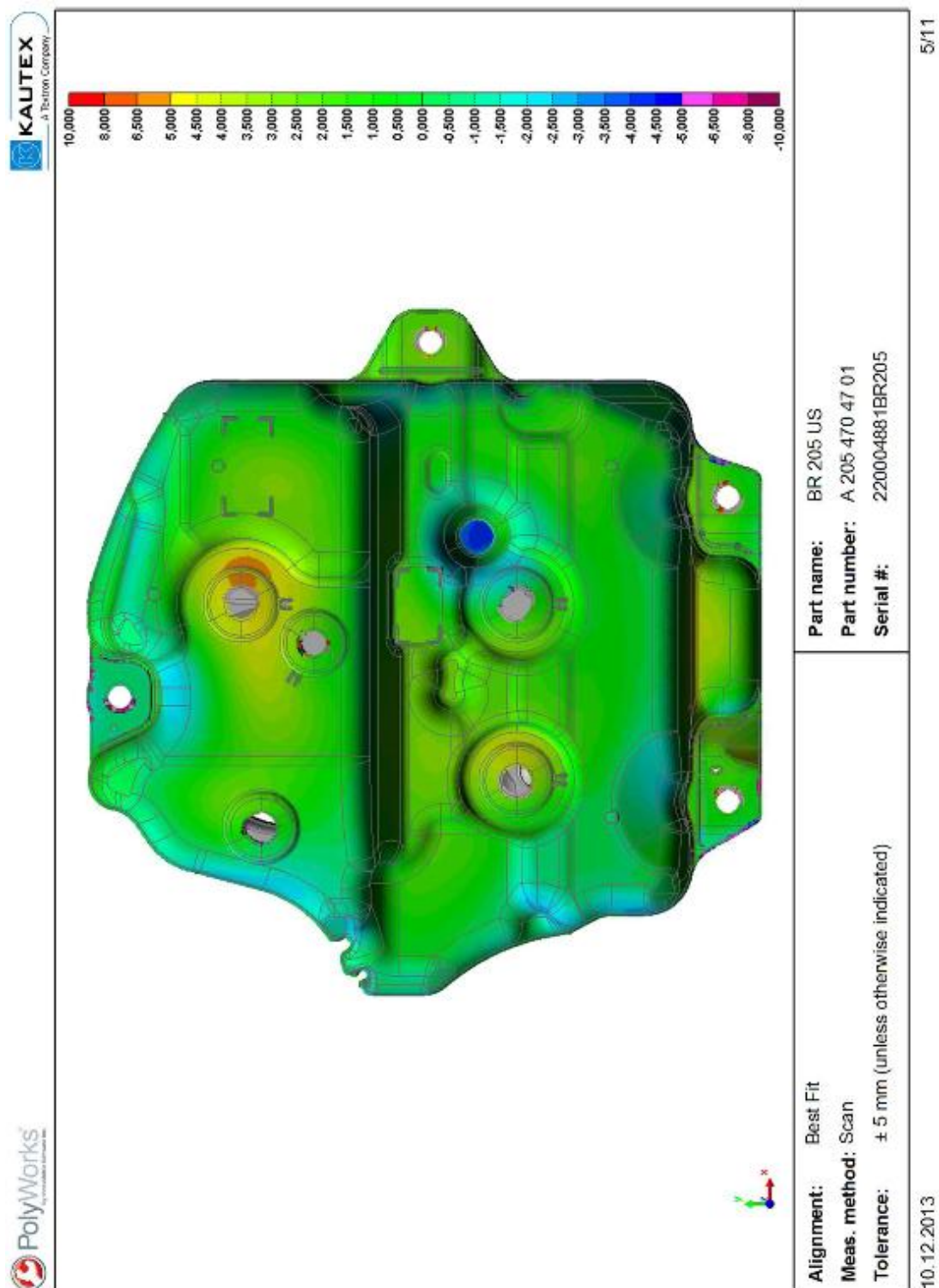


Příloha 4.4



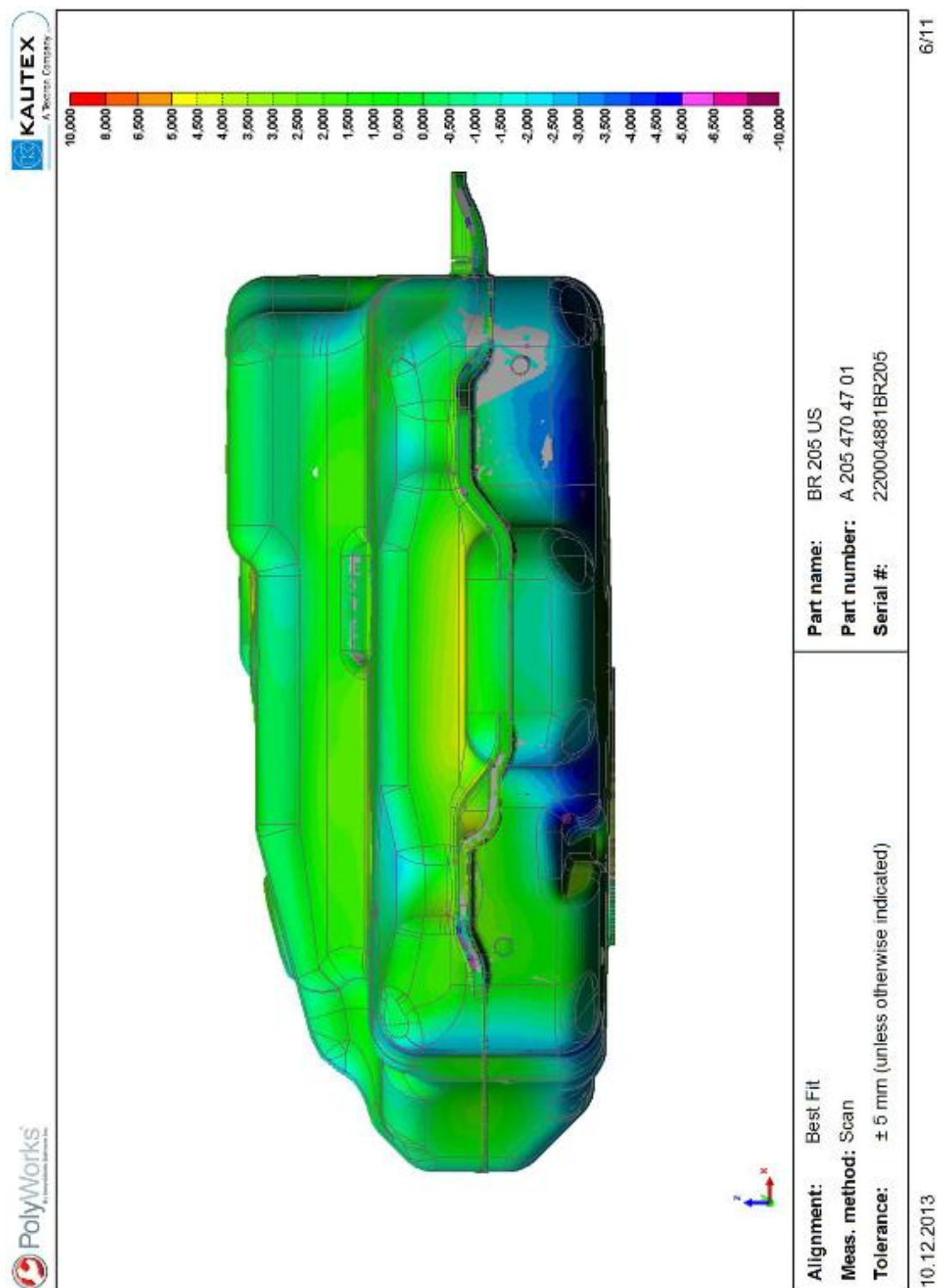


Příloha 4.5



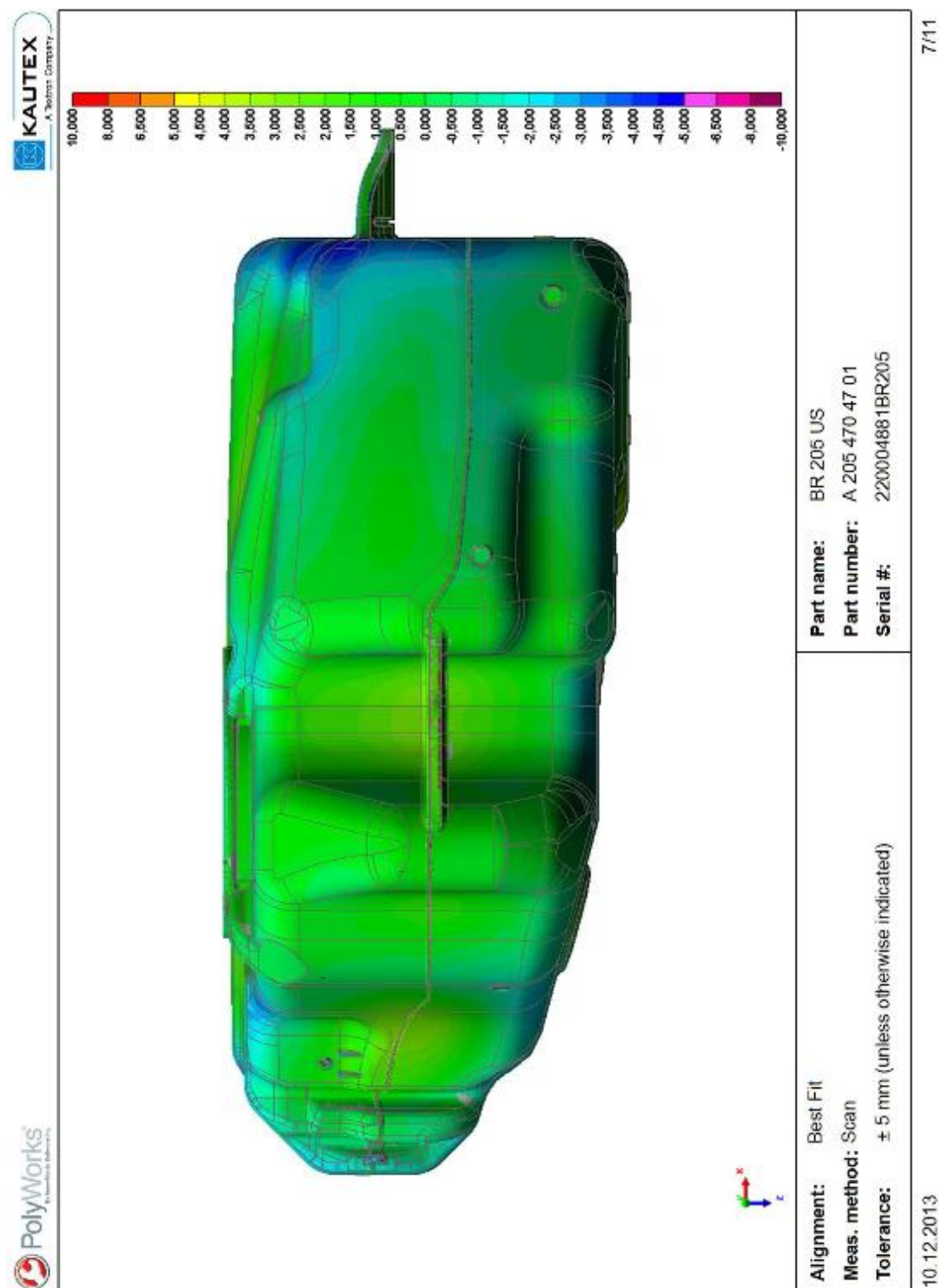


Příloha 4.6



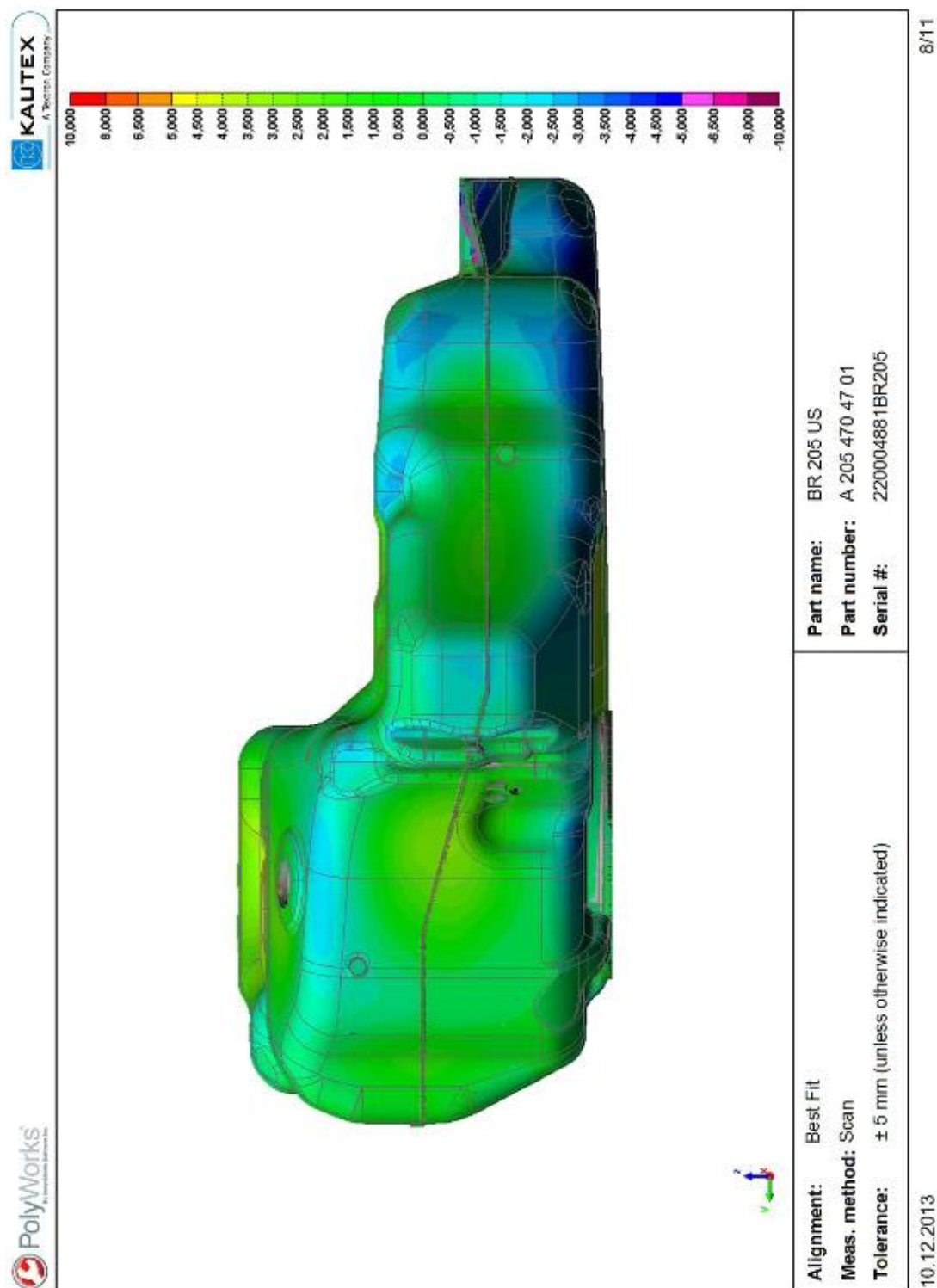


Příloha 4.7



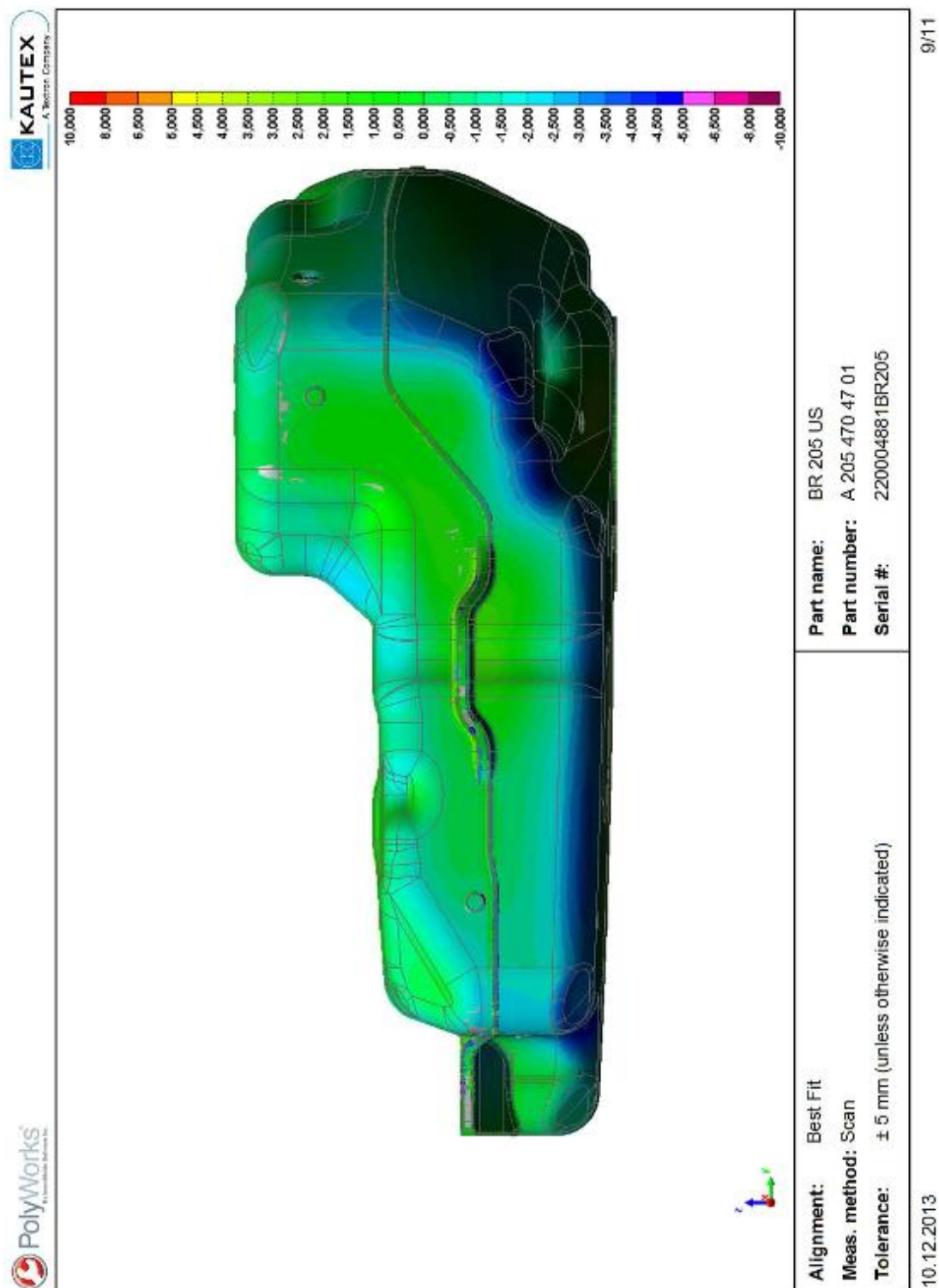


Příloha 4.8



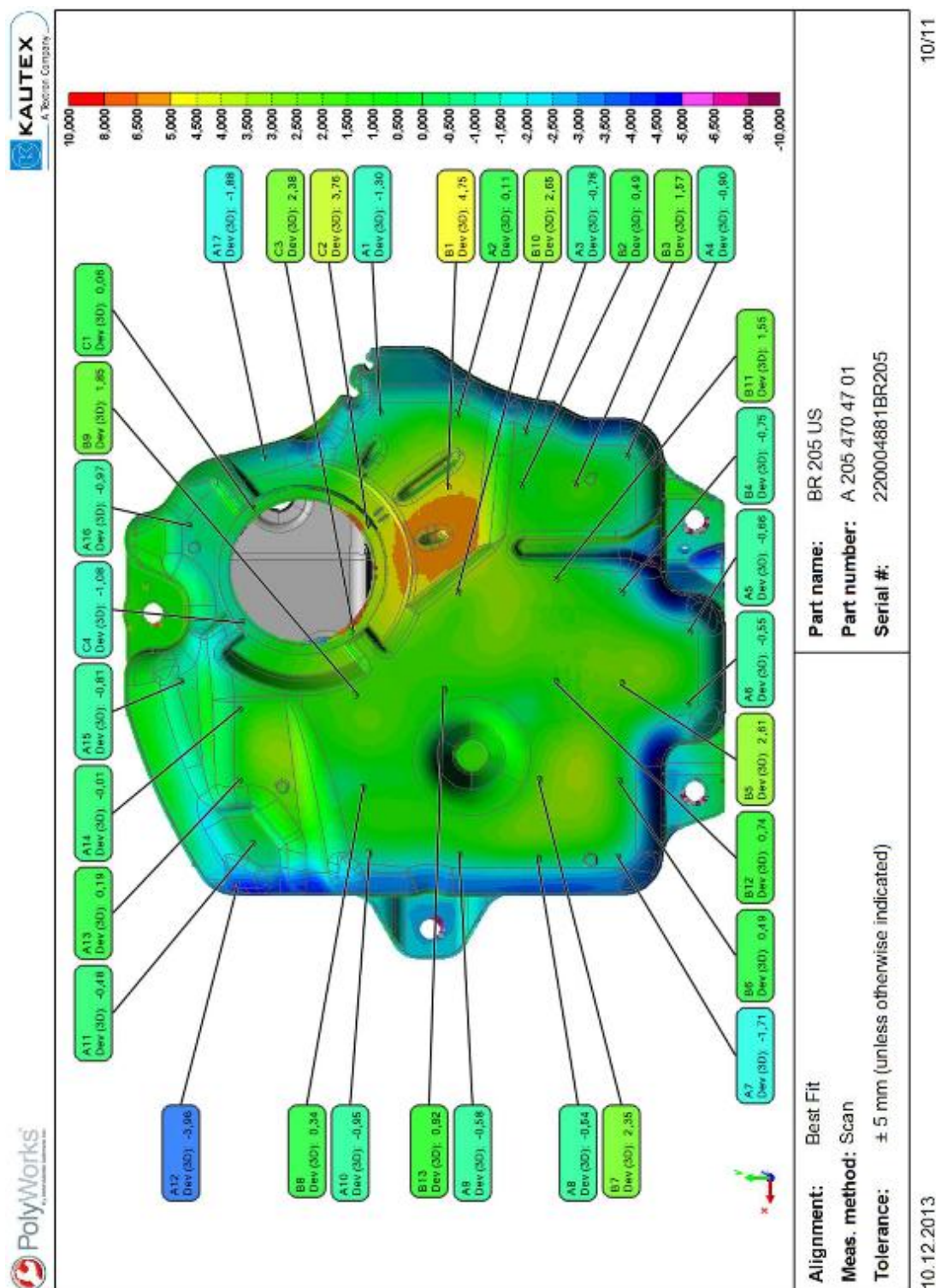


Příloha 4.9



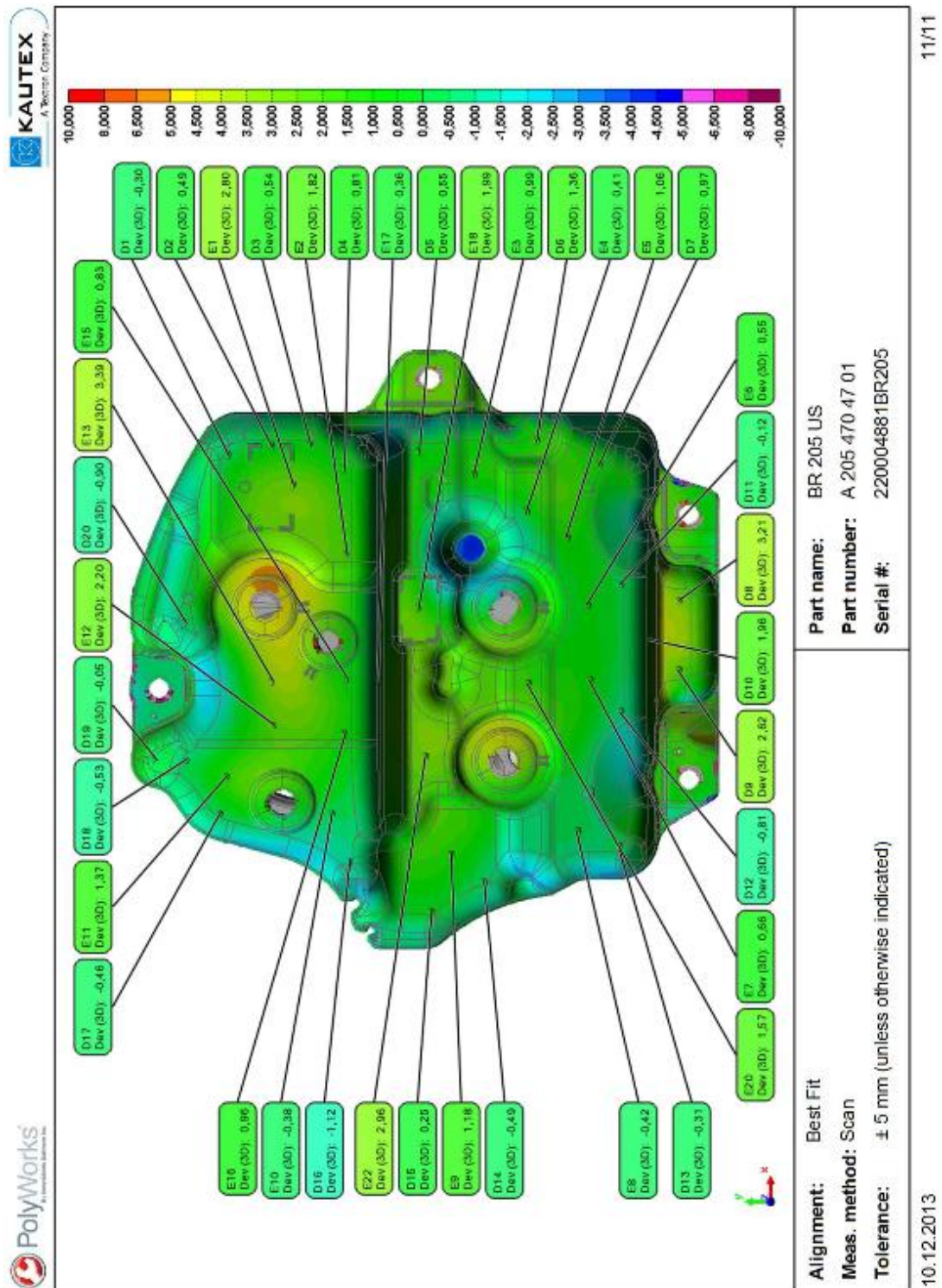


Příloha 4.10





Příloha 4.11





Příloha 5

Specifikace měřicího ramene Romer Absolute Arm RA – 7330 SI s integrovaným skenerem RS2

Specifikace 7osého snímání a skenování

	Model	Měřicí rozsah	Opakovatelnost bodu měření ¹	Prostorová přesnost snímání ²	Přesnost skenování o systému SI ⁴ (se systémem RS 2)	Přesnost skenování o systému SE ⁴ (se skenerem CMS 108)	Hmotnost ramene SI	Hmotnost ramene SE
řada 73	7320SI/SE	2.0 m	0.044 mm	± 0.061 mm	0.079 mm	0.075 mm	8.3 kg	7.9 kg
		6.6 stop	0.0017"	0.0024"	0.0031"	0.0030"	18.3 liber	17.4 liber
	7325SI/SE	2.5 m	0.049 mm	± 0.069 mm	0.084 mm	0.080 mm	8.6 kg	8.2 kg
		8.2 stop	0.0019"	0.0027"	0.0033"	0.0031"	19.0 liber	18.1 liber
	7330SI/SE	3.0 m	0.079 mm	± 0.100 mm	0.119 mm	0.113 mm	8.9 kg	8.5 kg
		9.8 stop	0.0031"	0.0039"	0.0047"	0.0044"	19.6 liber	18.7 liber
	7335SI/SE	3.5 m	0.099 mm	± 0.125 mm	0.147 mm	0.140 mm	9.2 kg	8.8 kg
		11.5 stop	0.0039"	0.0049"	0.0058"	0.0055"	20.3 liber	19.4 liber
	7340SI/SE	4.0 m	0.115 mm	± 0.151 mm	0.181 mm	0.172 mm	9.5 kg	9.1 kg
		13.1 stop	0.0045"	0.0059"	0.0071"	0.0068"	20.9 liber	20.1 liber

MĚŘICÍ RAMENO ROMER ABSOLUTE ARM, LASEROVÉ SKENERY

Specifikace skeneru	Integrovaný skener RS2		Externí skener Hexagon CMS 108
	Max. počet sejmutých bodů	50'000 bodů/s	30'000 bodů/s
	Počet bodů na řádek	1000	max. 2000
	Frekvence	50 Hz	max. 53 Hz
	Šířka řádku (střední dosah)	65 mm	124 mm / 60 mm / 25 mm
	Pracovní vzdálenost (střední dosah)	150 mm ± 50 mm	180 mm ± 40 mm
	Minimální rozestupy bodů (střední dosah)	0.046 mm	0.025 mm
	Řízení výkonu laseru	Poloautomatické – po řádcích	Plně automatické – po bodech
	Přesnost (2 sigma) ⁵	30 μm	20 μm
	Hmotnost	340 g	398 g
	Řídicí jednotka	Ne	Ano
	Třída laseru	Třída 2M	Třída 2
	Provozní teplota	5°C – 40°C (41°F – 104°F)	10°C – 42°C (50°F – 108°F)



Příloha 6

Protokol z měření ITT recyklátu na výtlačném kapilárním plastometru

SCR - 01 - 22 KTBO		Požadavek / Uvonení výroby		KAUTEX A. Textron Company	
Číslo dluh:	X	Název dluh:	BR 205US	Zadatel:	Bišický V.
				Termín-OD:	07.12.13
Číslo BH:	X	Popis zkoušky:	ITT dle ČSN EN ISO 1133	Termín-DO:	20.12.2013
				Foto2	
Popis zkoušky:	experiment hodnocení degradace recyklátu PE Lupolen 4261 A Q 135				
Poznámka:	x				
Číslo protokolu:	12.12.2013	Měnový technik:	V. Bišický	Datum provedení zkoušky:	12.12.2013
				Vydání k termínu:	
Výsledky testů:					
Jednotka:	Hodnota:	Test:	Adresa:		
[cm ³ /10 min]	5,89	vzorek 2.1			
[cm ³ /10 min]	5,92	vzorek 2.2			
[cm ³ /10 min]	5,67	vzorek 2.3			
[cm ³ /10 min]	5,79	vzorek 3.1			
[cm ³ /10 min]	5,79	vzorek 3.2			
[cm ³ /10 min]	5,89	vzorek 3.3			
[cm ³ /10 min]	5,68	vzorek 4.1			
[cm ³ /10 min]	5,84	vzorek 4.2			
[cm ³ /10 min]	5,83	vzorek 4.3			
[cm ³ /10 min]	6,16	vzorek 5.1			
[cm ³ /10 min]	5,71	vzorek 5.2			
[cm ³ /10 min]	5,81	vzorek 5.3			
[cm ³ /10 min]	5,62	vzorek 6.1			
[cm ³ /10 min]	5,74	vzorek 6.2			
[cm ³ /10 min]	5,70	vzorek 6.3			
[cm ³ /10 min]	5,31	vzorek 7.1			
[cm ³ /10 min]	5,39	vzorek 7.2			
[cm ³ /10 min]	5,17	vzorek 7.3			
Poznámka: pouze pro účely experimentálního měření na FTSS014 do dočasně práce p. Bišického					
Výsledek zkoušky:		OK	NOK		
Výsledky zkoušky:					
Datum:		Jméno:	Poznámka:		
Výsledek zkoušky:		OK			
Výsledek zkoušky:		OK			
Saz: QS, Zpr: J. Nepl, Sch: P. Lochman		Strana 1 z 1			
Saz: QS, Zpr: J. Nepl, Sch: P. Lochman		Strana 1 z 1			

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date

Signature